



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5720

**Literaturrecherche zu Anfall,
Eigenschaften und Nutzung
von Reststoffen aus
Müllverbrennungsanlagen**

H. Schüttelkopf, R. Köster
Institut für Technische Chemie

August 1996

**Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt**

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 5720

**Literaturrecherche zu Anfall, Eigenschaften und Nutzung
von Reststoffen aus Müllverbrennungsanlagen**

H. Schüttelkopf

R. Köster

Institut für Technische Chemie

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1996

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

ISSN 0947-8620

Title: Review of the amount, the characterization and the utilization of solid residues from municipal solid waste incineration

Summary

A literature research on the characterization and the behaviour in the environment of solid residues from municipal solid waste incineration (MSWI) was performed. The objective of this report is to describe all more extended constructions using solid MSWI residues carried out at present or in the past. The relative importance of solid MSWI residues compared with other mineralized residues in Germany is described. Additionally, construction characteristics, chemical and mineralogical composition and the results of elution experiments of MSWI residues are presented. The last task of the literature research was the description of methods used for the immobilisation of toxic substances in MSWI residues. Since the utilisation of MSWI residues started already 100 years ago, extended scientific research was performed in context with the utilisation of MSWI residues. Therefore an actual definition of the remaining areas of "no additional research necessary" and "additional research necessary" is pointed out.

Zusammenfassung

Eine Literaturrecherche zu den Eigenschaften von MVA-Schlacke und ihrem Verhalten in der Umwelt wurde durchgeführt. Ziel dieser Literaturrecherche war die Erfassung aller großräumigen Einsätze, die unter Nutzung von MVA-Schlacken zur Zeit durchgeführt werden bzw. in der Vergangenheit durchgeführt wurden. Die Bedeutung der MVA-Schlacken im Gesamtrahmen der mineralisierten Reststoffe der Bundesrepublik Deutschland wurde dargestellt. Ergänzend wurden Erfahrungen mit Laborexperimenten erfaßt. Dazu gehören die bautechnische Untersuchung der Schlacken, die Untersuchung der chemischen und der mineralogischen Zusammensetzung und die bisher durchgeführten Studien zur Elution von Schadstoffen. Als letzte Frage klärt die Literaturrecherche, welche Immobilisierungsmethoden für Schadstoffe bereits durchgeführt wurden. Da man mit der Nutzung von MVA-Schlacken bereits vor ca. 100 Jahren begann, wurden bis heute umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen zur Nutzung von MVA-Schlacken durchgeführt. Daher wurden für den jetzigen Zeitpunkt die Bereiche „kein Forschungsbedarf“ und „Forschungsbedarf gegeben“ präzisiert.

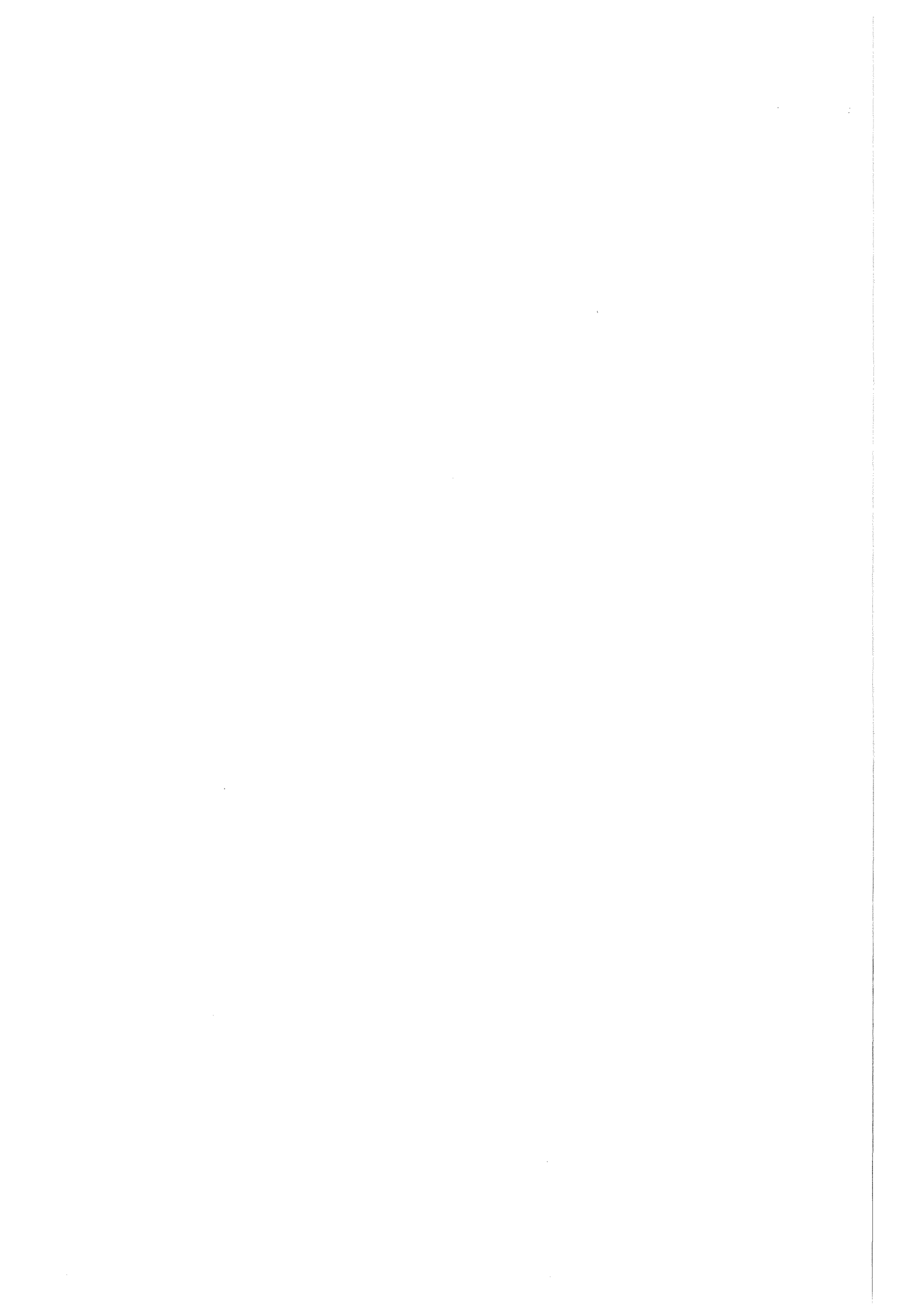
Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|--|-----------|
| 1. Problemstellung | 1 |
| 2. Feste Reststoffe in der Bundesrepublik Deutschland | 3 |
| 2.1 Feste Reststoffe ohne Hausmüll | 3 |
| 2.2 Aufkommen und Handhabung von Hausmüll | 4 |
| 3. Eigenschaften der Reststoffe aus Müllverbrennungsanlagen (MVA) | 8 |
| 3.1 Allgemeine Charakteristika von Schlacken | 8 |
| 3.2 Chemische Charakteristika | 9 |
| 3.3 Mineralogische Charakteristika | 10 |
| 3.4 Bautechnisch wichtige und physikalische Eigenschaften | 11 |
| 3.5 Elution von Schadstoffen | 12 |
| 4. Nutzung und Deponierung von MVA-Reststoffen | 16 |
| 4.1 Nutzung im Straßen- und Wegebau | 17 |
| 4.2 Deponien | 22 |
| 4.3 Lärmschutzwälle und andere große Erdbaumaßnahmen | 25 |
| 5. Möglichkeiten der Immobilisierung von Schadstoffen und der Verminderung von Schadstoffgehalten | 28 |
| 6. Gesetzliche Rahmenbedingungen | 30 |
| 7. Schlußfolgerungen | 31 |
| 7.1 Relative Bedeutung der mineralisierten Reststoffe in Deutschland | 31 |
| 7.2 Einsatz von MVA-Reststoffen im Straßen- und Wegebau | 32 |
| 7.3 Dicke Schichten von MVA-Schlacken auf Deponien und in Erdbauwerken | 32 |
| 7.4 Analyse der Zusammensetzung und Auslaugeigenschaften von MVA-Schlacken | 33 |
| 7.5 Immobilisierung von Schadstoffen in MVA-Schlacken | 34 |
| 7.6 Anlagen im Technikumsmaßstab für die geplanten FuE-Arbeiten | 34 |
| 8. Literatur | 36 |
| Anhang: Definition wichtiger Begriffe | 45 |

1. Problemstellung

Eine Literaturrecherche zu den Eigenschaften von MVA-Schlacke und ihrem Verhalten in der Umwelt war durchzuführen. Ziel dieser Literaturrecherche war die Erfassung aller großräumigen Einsätze, die auf diesem Gebiet unter Nutzung von MVA-Schlacken zur Zeit durchgeführt werden bzw. in der Vergangenheit durchgeführt wurden. Die Bedeutung der MVA-Schlacken im Gesamtrahmen der mineralisierten Reststoffe der Bundesrepublik sollte dargestellt werden, Erfahrungen mit Laborexperimenten erfaßt werden. Dazu gehören die bautechnische Untersuchung der Schlacken, die Untersuchung der chemischen und der mineralogischen Zusammensetzung und die bisher durchgeführten Studien zur Elution von Schadstoffen. Als letzte Frage soll die Literaturrecherche klären, welche Immobilisierungsversuche von Schadstoffen bereits durchgeführt wurden bzw. welche anderen Wege der Immobilisierung von Schadstoffen in MVA-Schlacken bisher begangen wurden. Da man mit der Nutzung von MVA-Schlacken bereits vor ca. 100 Jahren begann, wurden bis heute umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen zur Nutzung von MVA-Schlacken durchgeführt. Daher wurden für den jetzigen Zeitpunkt die Bereiche „kein Forschungsbedarf“ und „Forschungsbedarf gegeben“ präzisiert.

Für die Literaturrecherche wurden die CHEMICAL ABSTRACTS und die Datenbanken des Umweltbundesamtes - ULIDAT, UFORDAT und UFORKAT - und die Vortragssammlungen der beiden WASCON-Konferenzen von 1991 und 1994 benutzt. Die Namen der Verfasser der so identifizierten Publikationen wurden für eine zweite Recherche in den CHEMICAL ABSTRACTS benutzt. Aus der Sekundärliteratur der gefundenen Publikationen wurden weitere Arbeiten entnommen. Eine Reihe von direkten Kontaktaufnahmen mit Wissenschaftlern, die auf diesem Gebiet arbeiten, führten zu weiteren, oft sehr aktuellen Publikationen. Insgesamt wurden ca. 150 Arbeiten für diese Literaturrecherche benutzt.



2. Feste Reststoffe in der Bundesrepublik Deutschland

2.1 Feste Reststoffe ohne Hausmüll

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, sind Bodenaushub, Bauschutt und Straßenaufbruch mengenmäßig die wichtigsten Komponenten fester Reststoffe. Je nach betrachtetem Jahr und Verfasser liegen die Werte zwischen 38 und 126 Mt/a. Davon werden nach [6] etwa 50 % einer Wiederverwertung zugeführt. Die sehr hohen Daten von 95 Mt/a für Bodenaushub und 126 Mt/a für den Gesamtanfall stammen aus [3].

An mengenmäßig zweiter Stelle stehen die Nebengesteine der Kohlegewinnung. Von den 65 Mt/a werden nur etwa 20 % einer Verwertung zugeführt. An dritter Stelle steht der Hausmüll mit 25 - 42 Mt/a, für den im Kapitel 2.2 nähere Angaben folgen. Die mineralisierten Reststoffe, die aus der Hüttenindustrie und aus Feuerungsanlagen stammen, werden bereits seit langem praktisch vollständig der Bauindustrie als Sekundärbaustoffe zugeführt.

Für die in der Bauindustrie anfallenden festen Reststoffe und für die Summe der Industrieabfälle 1994 wird ein Betrag von 157 Mt/a angegeben [6]. Für die Jahre 1980 und 1982 werden 84 und 81 Mt/a für die gesamten festen Reststoffe der Bundesrepublik Deutschland mitgeteilt [9]. Viele Einzeldaten sind in [9, 10] angegeben. Zum Vergleich wird der Jahresbedarf an Baumaterial, speziell Boden, Kies und Sand, in der Bundesrepublik auf 500 - 1000 Mt/a geschätzt [3,4].

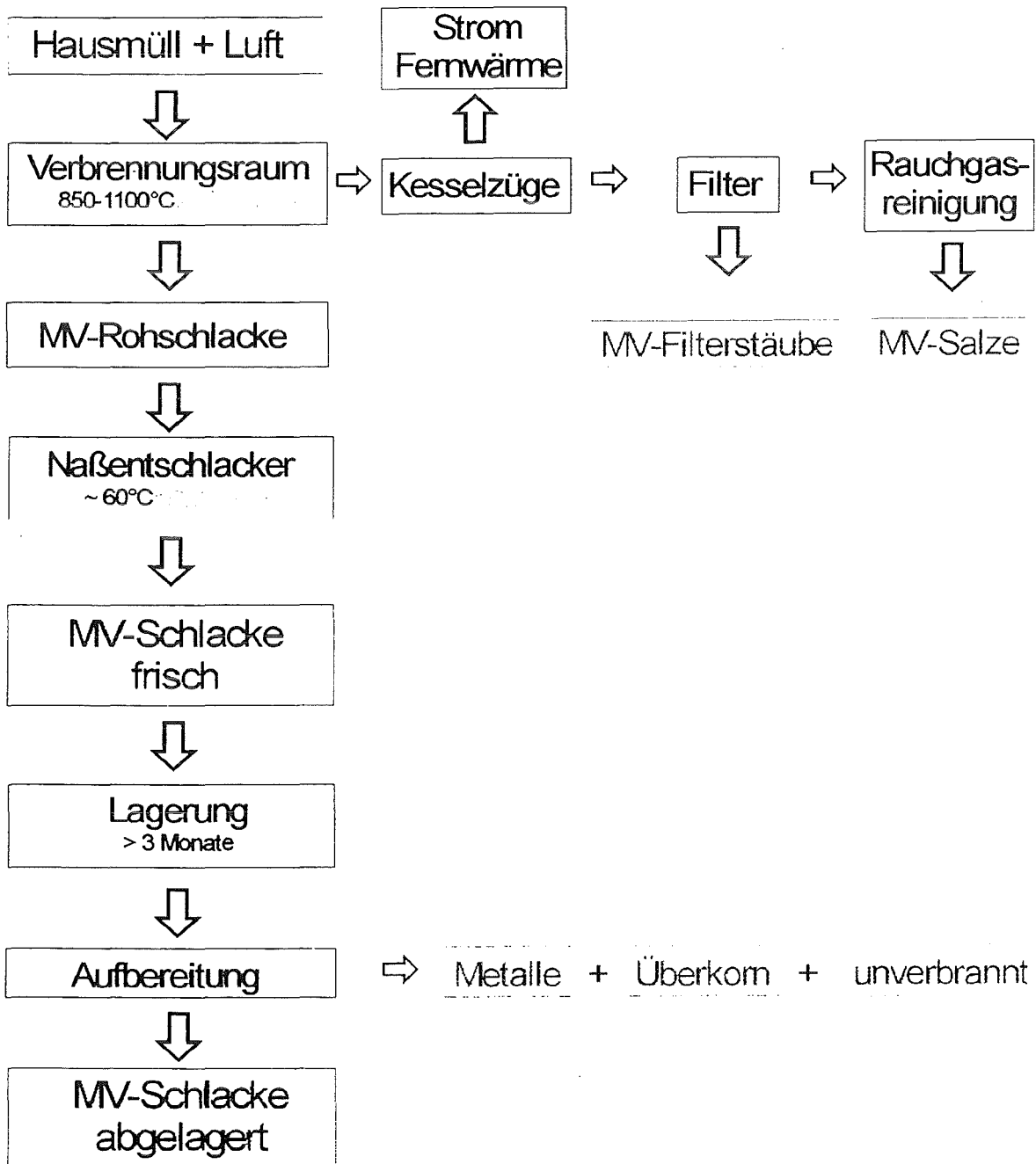
Tabelle 1: Anfall fester Abfallstoffe in der Bundesrepublik Deutschland

| Art des Abfallstoffes | Menge in Mt/a | Zitiert in |
|---|---------------|---------------|
| Bodenaushub | 31,9 - 95 | [2, 3] |
| Bauschutt | 16 - 25,8 | [2, 3] |
| Straßenaufbruch | 15 - 21 | [3, 4] |
| Gesamt | 38 - 126 | [1, 3, 5, 6] |
| Nebengesteine der Kohle | 65 | [6] |
| Hausmüll, Sperrmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle | 25 - 42 | [1 - 3, 7, 8] |
| Schlacken aus Feuerungsanlagen | 17 | [5] |
| Schlacken aus der Hüttenindustrie | 15 | [5] |
| Industrieabfälle | 5,0 - 5,1 | [1, 2] |
| Schlämme aus Kläranlagen | 2,3 - 2,8 | [1, 2] |
| Krankenhausabfälle | 1,0 | [1] |

2.2 Aufkommen und Handhabung von Hausmüll

MVA werden betrieben, um das Volumen des Mülls drastisch zu verkleinern und damit den verfügbaren Deponieraum zu schonen. Außerdem wird Energie gewonnen und eine weitgehende Inertisierung und Keimabtötung in den Abfällen erreicht. Auf Seite 5 wird das allgemeine Fließschema einer MVA dargestellt.

In den Jahren 1984 - 1994 werden in der Literatur jährliche Hausmüllaufkommen von 25 - 47 Mt angegeben (Tabelle 2). Es handelt sich dabei um Hausmüll, Sperrmüll und hausmüllähnlichen Gewerbemüll. Nur etwa ein Fünftel bis ein Drittel dieses Materials gelangt in Deutschland zur MVA. Während die Volumenverkleinerung des so behandelten Mülls einen Faktor 10 bis eventuell 20 beträgt, ist die Massenverkleinerung um einen Faktor 3 ein realistischer Mittelwert. In Tabelle 3 ist eine Aufschlüsselung der Reststoffe der Verbrennung in deren Komponenten wiedergegeben. Die wesentliche Komponente ist die Rohschlacke, und davon fallen in der Bundesrepublik 2,4 bis 3,5 Mt/a an. Sie ist es, die für eine Weiternutzung als Sekundärrohstoff von Interesse ist. In der Literatur [7, 13, 15, 88] werden Nutzungsgrade von 36 % bis 68 % der jährlich anfallenden Rohschlacke angegeben.



Allgemeines Fließschema einer Müllverbrennungsanlage

Tabelle 2: Anfall an Hausmüll, Sperrmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen in der Bundesrepublik Deutschland; Anteil, der zur MVA gelangt und Gesamtanfall von Rohschlacke und verwerteter Rohschlacke

| | | |
|------------------------|-----------------|-----------------------|
| Hausmüll | 25 - 47 Mt/a | [1-3, 7, 8, 14, 15] |
| Davon zur MVA | 8,5 - 10,5 Mt/a | [7, 8, 14] |
| Rohschlacke | 2,4 - 3,5 Mt/a | [6-8, 10-15] |
| Davon verwertet | 1,0 - 2,0 Mt/a | [6-8, 10, 12, 13, 15] |

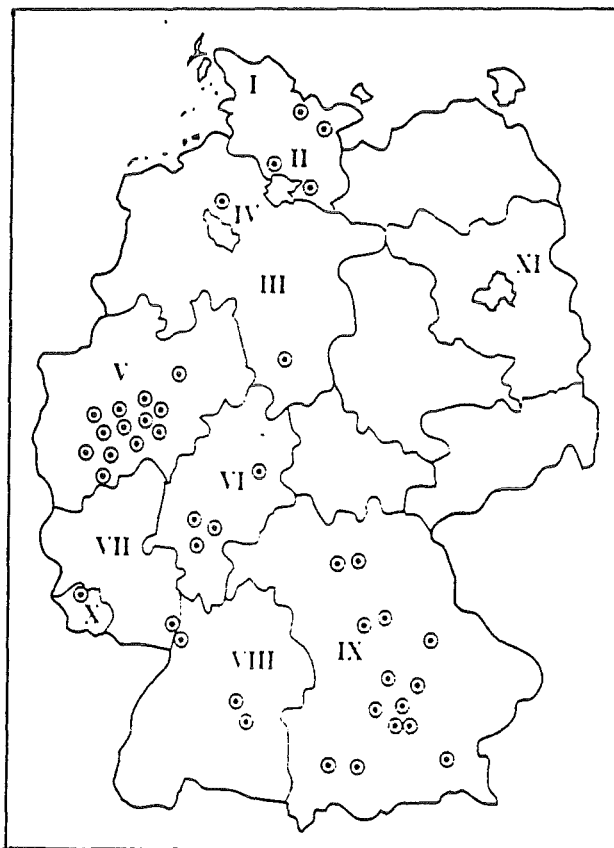


Abb. 1: Standorte der Hausmüllverbrennungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland [15]

Tabelle 3: Komponenten der festen Reststoffe der Hausmüllverbrennung, bezogen auf 1000 kg Hausmüll [7, 19]

| | |
|-------------------------------|--------------|
| Rohschlacke | 300 - 350 kg |
| Filterstäube | 30 - 40 kg |
| Rückstände der Abgasreinigung | 8 kg |

Die Standorte der MVA in Deutschland 1992 werden in Abb. 1 angegeben [15]. Um das Müllaufkommen international vergleichen zu können, wurden in Abbildung 2 und in Tabelle 4 für wichtige europäische Länder, für Japan, Kanada und die USA die Pro-Kopf-Rate an Hausmüll angegeben. Diskrepanzen zwischen den beiden Darstellungen dürften auf unterschiedliche Definitionen von Müll und unterschiedliche Bezugsjahre zurückzuführen sein.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden für einige wenige Länder Angaben zu ihrer Rohschlacken- und Filterstaubproduktion gefunden. In Italien fallen 1,8 Mt Rohschlacke und 0,5 Mt Filterstäube pro Jahr an [16]. In Dänemark sind dies 0,28 Mt Rohschlacken und 0,7 Mt Stäube [17]. In Schweden werden jährlich 0,3 Mt Rohschlacken produziert [18]. In den Niederlanden sind es 0,65 Mt Rohschlacke und 0,1 Mt Filterstäube pro Jahr [20]. Neuere Daten können aus Tabelle 4 entnommen werden [19].

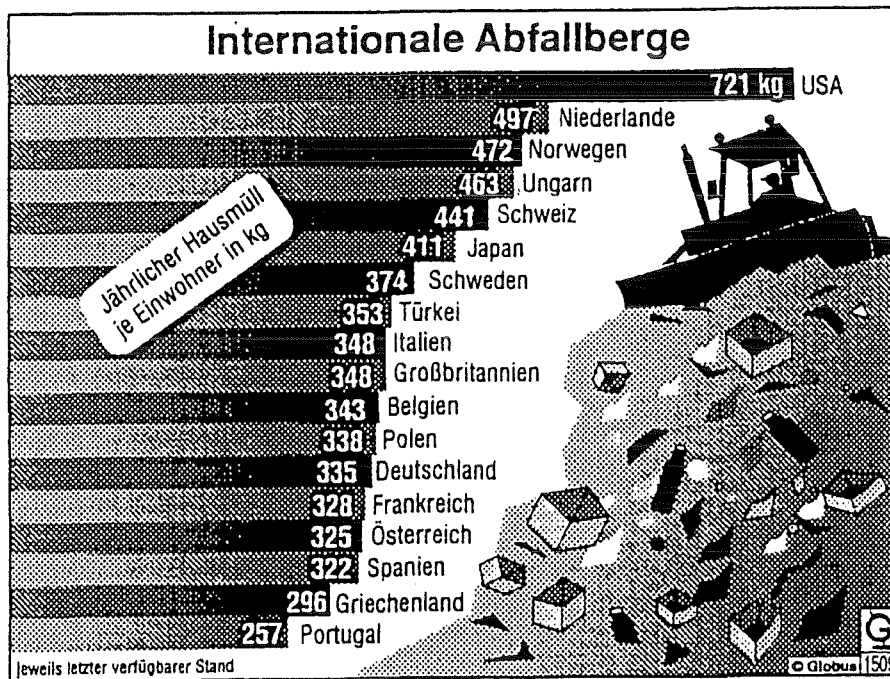


Abb. 2: Jährliche Pro-Kopf-Produktion an Hausmüll in wichtigen OECD-Ländern [21]

Tabelle 4: Zusammenfassung der Strategien der Hausmüllbehandlung in ausgewählten Ländern [19]

| Country | Generation kg/person/day | Landfill % | Incineration % | Recycling % |
|-----------------------|-----------------------------|---------------|-------------------|----------------|
| Canada (1988) | 1.7 | 82 | 8 | 10 |
| Denmark (1990) | 1.3 | 25 | 25 | 50 |
| France (1990) | 0.95 | 21 | 21 | 58 |
| Germany (1992) | 1.4 | 46 | 36 | 18 |
| Japan (1991) | 0.8 | 10 | 77 | 13 |
| Netherlands (1992) | 1.0 | 42 | 31 | 27 |
| Sweden (1991) | 1.2 | 40 | 55 | 5 |
| Switzerland (1992) | 1.2 | - | 80 | 20 |
| United Kingdom (1988) | 0.8 | 86 | 7 | 7 |
| USA (1991) | 1.6 | 67 | 16 | 17 |

3. Eigenschaften der Reststoffe der MVA

3.1 Allgemeine Charakteristika von Schlacken

Die Komponenten der Rohschlacke wurden in vier Publikationen detaillierter aufgeschlüsselt und sind in Tabelle 5 dargestellt. Da die Publikationen in den Jahren 1982, 86, 92 und 94 erschienen, ist auch eine gewisse zeitliche Bewertung der Entwicklung der Schlackenzusammensetzung zu erkennen. Während ursprünglich im Müll enthaltenes Glas und Keramik ganz wesentlich abnehmen, bedingt durch eine getrennte Sammlung, stabilisiert sich der eigentliche für das Baugewerbe nutzbare MVA-Schlacken-Anteil mit kleiner 32 mm Korngröße im Bereich von 80 % der Rohschlacke. Die Metallgehalte sind im wesentlichen abhängig von der lokalen Industrie und können noch wesentlich höhere Werte als in Tabelle 5 angegeben annehmen, wenn metallverarbeitendes Gewerbe in dem Bereich vertreten ist.

Tabelle 5: Komponenten der Rohschlacke

| Komponenten der Rohschlacke | Gehalte in Gewichts% nach Literaturdaten | | | |
|-----------------------------|--|--------------|--------------|-------------|
| | [23] 1982 | [61] 1986 | [15] 1992 | [8] 1994 |
| MVA-Schlacke ≤ 32 mm | 20 - 69 | 32 - 77 | 80 - 85 | 75 - 80 |
| Metall | 0 - 4 | 0 - 17 | 8 - 10 | 4 - 7 |
| Glas und Keramik | 30 - 77 | 8 - 71 | --- | --- |
| Überkorn | --- | 0 - 18 | 5 | 8 - 12 |
| Unverbranntes | 0 - 8 | 0 - 8 | 5 | 2 - 5 |

3.2 Chemische Charakteristika

Die International Ash Working Group hat in ihrem Summary Report von 1995 [19] die wichtigsten chemischen Eigenschaften von MVA-Schlacke angegeben. Der pH liegt zwischen 9,5 und 11,5. Die Säureneutralisationskapazität liegt unter 4,5 meq/g [19, 94].

Die Hauptelemente mit mehr als 10 g/kg sind O, Si, Fe, Ca, Al, Na, K und C. Diese Elemente entsprechen 80 - 90 % des Gesamtgewichtes der Schlacke. Der Bereich der Konzentrationen wichtiger Elemente ist in Tabelle 6 angegeben. Die Nebenbestandteile, 1 bis 10 g/kg, umfassen Mg, Ti, Mn, Ba, Zn, Cu, Pb und Cr. Die Spurenelemente, unter 1 g/kg, sind Sn, Sb, V, Mo, As, Se, Sr, Ni, Co, Ce, Hg, Ag, B, Br, F und I. Die Konzentration von flüchtigen Schwermetallen wie z. B. Cd, Zn und Pb hängt ganz wesentlich von der Betriebsführung und vom Typ der Verbrennungsanlage ab. Der lösliche Anteil liegt unter 14 %, in manchen Anlagen unter 5 % des Schlackengewichtes.

Die Konzentrationen von PCDD, PCDF, polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, Chlorphenolen und Chlorbenzolen, liegen unter 2 µg/g..

Tabelle 6: Elementzusammensetzung der Rohschlacke aus verschiedenen MVA nach [19] (Die Elementzusammensetzung ist nicht vollständig. Es fehlen z. B. Fe, Zn, Cd, usw.)

| Element | Konzentrationsbereich in mg/kg |
|---------|--------------------------------|
| Al | 22.000 - 73.000 |
| Ca | 3.900 - 120.000 |
| Cd | 0,3 - 61 |
| Cl | 800 - 4.200 |
| K | 750 - 16.000 |
| Mg | 400 - 26.000 |
| Na | 2.900 - 42.000 |
| Pb | 98 - 6.500 |
| S | 1.000 - 5.000 |
| Si | 91.000-310.000 |

In [16] wird eine umfangreiche Untersuchung der glasartigen und der kristallinen Teile der Schlacken durchgeführt. Es werden sowohl mineralogische, als auch chemische, als auch Elutionsexperimente beschrieben. Nach [34] sind 95 % der Rohschlacke Oxide, etwa 50 % sind kristallin und 50 % glasartig. Nach [60] sind 85 % der Rohschlacke aus einer Schmelze entstanden. Eine umfangreiche Analyse der organischen Schadstoffe in MVA-Schlacke wird in [15] wiedergegeben. Weitere hervorragende Arbeiten sind [52, 58]. Weitere Analysen von Schlacken sind enthalten in [8, 11, 14, 15, 23, 24, 29, 37, 42, 51, 53-55, 58, 62].

3.3 Mineralogische Charakteristika

In [59] werden die wichtigsten Mineralphasen in MVA-Schlacke und in Filterstäuben bestimmt. Für die MVA-Rohschlacke wird Quarz als wichtigste Komponente mit 30 - 50 % angegeben, Magnetit mit 20 - 30 %, Calcium- und Aluminiumsilikate < 20 % und Calcium-, Eisen-, Magnesiumphosphate < 5 %. Von L. PAOLETTI [16] werden umfangreiche mineralogische Angaben zur Zusammensetzung des nichtglasartigen Anteils der Rohschlacke von mehreren MVA angegeben. In Tabelle 7 sind einige der Mineralphasen mit ihren Konzentrationsbereichen angegeben. Wie bei [16] wird auch in [58, 60] ein außergewöhnlicher apparativer Aufwand für die Bestimmung der einzelnen kristallinen Phasen in der Müllverbrennungsschlacke eingesetzt. Weitere Daten zu diesem Thema finden sich in [11, 52].

Tabelle 7: Mineralische Zusammensetzung des kristallinen Teils der Schlacke [16]

| Mineral | Konzentrationsbereich in % |
|---------------------------|----------------------------|
| SiO ₂ | 18 - 64 |
| CaCO ₃ | 22 - 32 |
| Plagioklas | 4 - 36 |
| Orthoklas | 7 - 18 |
| Spinelle | 7 |
| Aluminium (metallisch) | 2,5 - 4 |

3.4 Bautechnisch wichtige und physikalische Eigenschaften

G. KLUGE berichtet 1982 von der systematischen Anwendung typischer Straßenbauprüfverfahren auf die Schlacken von 6 verschiedenen Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland [61]. Es handelt sich um die MVA Hamburg, Kiel, Hagen, Wuppertal und Stuttgart. In seinem Bericht untersucht er die Grobzusammensetzung, die Eigenfeuchtigkeit, die Korngrößenverteilung, die Kornform, den Glühverlust bei 850 °C, die Rohdichte, die Proctor-Dichte, die Schlagfestigkeit und den Widerstand gegen Frost- und Tauwechsel.

Er gibt an, daß für die 2 Mt Rohschlacken pro Jahr, die zu diesem Zeitpunkt in der Bundesrepublik anfallen, etwa eine Deponiefläche von ca. 62.000 m²/a benötigt werden. Um die Schlacken so bald wie möglich im Rahmen des Straßenbaus einsetzen zu können, wurde von der Bundesregierung schon 1972 ein Forschungsauftrag erteilt. Eine Überprüfung der damals eingebauten Schlacken erfolgte 6 Jahre später. Aus den Literaturangaben dieser Arbeit sind alle für die obigen Messungen benötigten Prüfungsvorschriften der Bundesrepublik Deutschland zu entnehmen.

Weitere umfangreiche Untersuchungen an 20 verschiedenen Rohschlacken sind in [23] enthalten. Einzelne Bereiche straßenbaulicher Eignung werden untersucht in [7, 11, 12, 15, 23-25, 36, 49, 51]. Wichtige chemische Prozesse wie Verwitterungsvorgänge, CO₂-Absorption und Calciumsilikathydrat-Bildung, die in MVA-Schlacken ablaufen, sind in Tabelle 8 dargestellt [34].

Tabelle 8: Die mengenmäßig wichtigsten Reaktionen in der MVA-Schlacke [34]

| Reaktion | Zeitdauer | Einfluss auf die Alkalinität |
|---|--------------|-------------------------------|
| $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ | Jahrzehnte | kein Einfluss |
| $\text{Ca(OH)}_2 + \text{SiO}_2 \longrightarrow \text{CaH}_2\text{SiO}_4$ | Jahrzehnte | potentiell negativ |
| $\text{Me Al Silikat} + n\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Me}^{n+} + \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Al Silikat}$ | Jahrtausende | puffernd im sauren pH-Bereich |
| $\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Al(OH)}_3 + 3/2 \text{H}_2$ | Jahrzehnte | kein Einfluss |
| $\text{Fe} + 3/4\text{O}_2 + 3/2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Fe(OH)}_3$ | Jahrzehnte | kein Einfluss |
| $\text{FeS}_2 + 15/4\text{O}_2 + 7/2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Fe(OH)}_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$ | Jahrzehnte | Abnahme von ca. 5% |
| Oxidation des organischen Materials | ? | potentiell negativ |

* Me = Metall

3.5 Elution von Schadstoffen

Die wesentliche Kritik am Einsatz von Reststoffen der Müllverbrennung in der Bauindustrie bezog bzw. bezieht sich auf unzureichende bautechnische Qualität und auf die mangelnde wasserwirtschaftliche Unbedenklichkeit. Der erste Punkt dürfte in Anbetracht der nun jahrzehntelangen Erfahrung von Schlackenaufarbeitungsbetrieben und Schlackennutzern heute weitgehend ausgeräumt sein. Die bautechnische Eignung ist nachgewiesen, und die Qualität der aufgearbeiteten MVA-Schlacken ist in hohem Maße konstant.

Zur wasserwirtschaftlichen Unbedenklichkeit ist zu sagen, daß sich die Wissenschaftler darüber einig sind, daß nicht der Inhalt, sondern der auswaschbare bzw. der mobile Teil betrachtet werden muß. Um diesen Anteil zu bestimmen, gibt es in den Deutschen Einheitsverfahren den sogenannten DEV-S4-Test, DIN 38414, Teil 4, [71]. Dieses Verfahren ist das einzige z. Zt. in Deutschland anerkannte Verfahren zur Bestimmung der Mobilität von Schadstoffen in Schlacken. Ursprünglich wurde es angewandt auf Schlämme und wurde aus diesem Bereich zur Prüfung von primären und sekundären Baustoffen übernommen.

Der DEV-S4-Test besteht aus der Einbringung von 100 g Probematerial in eine 2 l-Weithalsflasche und die Bedeckung dieser Probe mit 1 l destilliertem Wasser. 24 Stunden wird bei Raumtemperatur in einem Überkopfschüttler die Probe und das Wasser durchmischt. Danach wird entweder filtriert oder zentrifugiert. In der erhaltenen klaren Lösung wird pH, Leitfähigkeit, Schwermetallgehalt usw. bestimmt.

Da dieses sehr einfache Verfahren deutsches Standardverfahren ist, findet man Ergebnisse bei jeder bautechnischen oder wissenschaftlichen Untersuchung von MVA-Schlacken. In [7] wurden MVA-Schlacken und Deckschichtmaterialien eines Lärmschutzwalls untersucht. In [11] wurden MVA-Schlacken von verschiedenen Anlagen, nicht gelagert und verschieden lange gelagert, und natürliche Baustoffe nach dem DEV-S4-Test bewertet. In [14] wurden MVA-Schlacken und drei Siebfraktionen unterschiedlicher Korngröße geprüft. Alle gemessenen Schadstoffkonzentrationen in den Lösungen sind in Übereinstimmung mit den meisten anderen hier erwähnten Messungen unter den Grenzwerten der deutschen Trinkwasserverordnung. Ein ähnlicher Vergleich zwischen den mit Schlacken erhaltenen Eluatkonzentrationen und den deutschen Trinkwassergrenzwerten und den Grenzwerten der EG wurde in [64] durchgeführt. DEV-S4-Ergebnisse werden außerdem dargestellt in [3, 15, 20, 24, 37, 44, 49, 51, 74, 80]. In [29] werden die Ergebnisse von DEV-S4-Tests mit MVA-Schlacken, die bereits 8 bis 10 Jahre in einem Straßenbau eingesetzt waren, wiedergegeben. Als Ergebnis gibt der Verfasser an, daß die Elutionsdaten denen natürlicher Böden mit Vorbelastung, wie z. B. in Großstädten, entsprechen. In [28, 42, 46] werden die in Sickerwässern erhaltenen Konzentrationen mit denen von Auslaugetests verglichen.

Es ist kaum anzunehmen, daß der DEV-S4-Test für Sedimente erfunden wurde, um das Verhalten von Sedimenten in der Umwelt unter allen nur denkbaren Bedingungen verstehen zu können. Z. B. werden Sedimentschichten nur wenige Millimeter unter der Oberfläche anaerob; das Verhalten der Schadstoffe in diesen anaeroben Sedimentschichten kann durch den DEV-S4-Test selbstverständlich nicht wiedergegeben werden.

Bezüglich der Bewertung von MVA-Schlacken sind folgende Kritikpunkte aufzuzählen: Der pH stellt sich während des Tests auf 9 bis 11 ein. Bei diesem pH werden amphotere Elemente wie Zink und Blei deutlich überproportional gelöst, während andere Schwermetalle extrem unlöslich gebunden werden. Der Test ist generell wenig unterscheidend, so daß Schlacken verschiedener Herkunft und Behandlung meist sehr ähnliche Ergebnisse bringen. Von der Anwenderseite her ist störend, daß Korngrößen über 10 mm beim DEV-S4-Test praktisch nicht eingesetzt werden können. Dies ist besonders wichtig, da in der Bauindustrie der Bereich von ca. 0,5 - 32 mm Durchmesser eingesetzt wird. Das Flüssig-Fest-Verhältnis von 10 ist viel zu hoch und absolut nicht praxisingerecht. Bei gebundenen MVA-Reststoffen oder solchen, die durch Zement verfestigt wurden, wird praktisch nichts ausgelaugt und daher ist eine vergleichende Betrachtung der Eignung nicht möglich. Dazu kommt noch, daß selbstverständlich bei größeren Schichtdicken und bei Betrachtung des Sickerwassers wesentlich höhere Konzentrationen zumindest bei Cl^- , SO_4^{2-} usw. beobachtet werden und daß der pH-Verlauf innerhalb dickerer Schichten vollständig anders ist als während dieses Tests. Zu berücksichtigen ist, daß sich je nach Dichte des Materials eventuell nach geringen Schichtdicken bereits anoxische Bedingungen einstellen, die unter anderem zur Senkung der Löslichkeit von vielen Schwermetallen führen. Dies alles kann selbstverständlich nicht - und wurde auch wohl nie beabsichtigt - mit dem DEV-S4-Test beurteilt werden.

VAN DER SLOOT et al. geben in [63] die holländischen Testverfahren an. Die Verfügbarkeit wird mit einem Flüssig-Fest-Verhältnis von 2 und von 10 gemessen.

Ein weiterer Test erfolgt bei einem Verhältnis flüssig-fest von 50 bei konstant gehaltenem pH von 4 und 8. In dieser Arbeit werden ausführlich Fragen der Kapazität, der Gleichgewichtseinstellung und der Messung kinetischer Größen besprochen. Säulenexperimente werden beschrieben, und eine interessante theoretische Behandlung der Ergebnisse der Säulenexperimente wird angegeben. In [55] beschreiben die Verfasser modifizierte Tests für das Labor und erweitern die Verfügbarkeits-tests um eine Stufe, bei der oxidierende Bedingungen durch H_2O_2 hergestellt werden. Die normalen Verfügbarkeits-tests und die mit H_2O_2 geben ausschließlich bei Eisen unterschiedliche Ergebnisse. Keine Unterschiede wurden gemessen bei: Ca, K, Mg, Na, S, Si, Al, As, Ba, Cd, Co, Ni, Zn, V, Cr, Cu und Pb. Weitere Modifikationen und Anwendungen der holländischen Tests werden in [58, 60] angegeben. In diesen Arbeiten werden auch ausführliche Verfügbarkeits-ergebnisse in Abhängigkeit vom pH zwischen 2 und 14 für 22 Elemente dargestellt.

In [11] wird ein Schweizer Testverfahren beschrieben, das den pH zwischen 5 und 6 durch CO_2 -Einleitung konstant hält und das für die Bewertung der Schwermetallverfügbarkeit und das Langzeitverhalten besser geeignet ist. In [65] wird versucht, die Mängel des DEV-S4-Tests betreffend der eingesetzten Probemenge zu verbessern. Es werden Probemengen bis zu 2,5 kg und praktisch alle bei MVA-Schlacken anfallenden Korngrößen eingesetzt. Die Methode wurde 1990 durch einen Arbeitskreis der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen erarbeitet. Ein ähnliches Verfahren wurde in [70] auf Flugasche, stabilisiert mit Zement, im Rahmen einer Vergleichsmessung zwischen verschiedenen Laboratorien angewandt.

In [17] wurde ein Modell für die Auswaschung mit der Zielsetzung entwickelt, Veränderungen im Grundwasser so früh wie möglich erfassen zu können. Der Verfasser gibt Na^+ als das geeignete Leitelement an. Ebenfalls Grundlagen zur Auswaschung von MVA-Schlacken und Baumaterialien sind in [68] enthalten. Weitere Themen der Untersuchung sind: Elution und Langzeitverhalten [34], Filterkapazität für schwerer Schadstoffe [67], Auslaugen unter reduzierenden Bedingungen [69] und die Anwendung einer mehrstufigen Auslaugetechnik, die ursprünglich für Böden entwickelt wurde [72].

In [56] wird dargestellt, welche Mineralien im Boden den pH während der Elution beeinflussen. Der Verfasser kommt zum Ergebnis, daß es Gips, Ettringit und Gibbsit sind, die im wesentlichen zu früheren und späteren Zeitpunkten den pH der MVA-Schlacke während der Langzeitelution bestimmen. Ein Modell für die Calciumauslaugung wird aufgestellt.

Eine Liste wichtiger, international benutzter Auslaugetests wird aus [19] entnommen und in Tabelle 9 wiedergegeben.

Tabelle 9: Auslaugtests für gekörntes Material [19]

| Extraction tests | | | | | |
|------------------------------|---------|-----------|-----------------|------------------|--------------|
| Region | pH 4 -5 | pH 5 - 6 | Matrix Dictated | Complexation | Low LS |
| TCLP | | Swiss TVA | DIN 38414 S4 | MBLP (synth.) | MBLP |
| EPtox | | | AFNOR X-31-210 | (California WET) | Modified DIN |
| Availibility test (NEN 7341) | | | Canada EE | | WisconsinSLT |
| California WET | | | MCC-3C (Canada) | | |
| Ontario LEP | | | ASTM D 3987 | | |
| Quebec QRsQ | | | ILT-13 | | |

| Dynamic tests | | |
|-----------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Serial Batch (low LS) | Serial Batch LS > 10 | Percolation or flow through tests |
| UHHamburg | NF-X31-210 | NEN 7343 (NVN2508) Column up flow |
| WRU | WRU | ASTM Column up flow |
| | ASTM D4793-88 | Column Germany (pH static) |
| | NEN 7349 (NVN 2508) | Lysimeter tests |
| | MEP method 1320 | |
| | Sweden ENA | |
| | MWEP | |

| Static tests | Speciation Methods |
|--|--------------------------------|
| MCC-1 | Sequential Chemical Extraction |
| MCC-2 | pH stat procedures |
| Compacted granular tank leach test (Rutgers/ECN) | |

L/S = Flüssig-Fest-Verhältnis

Es versteht sich von selbst, daß trotz der Wichtigkeit der Untersuchung der Auslaugbarkeit eine Laborlösung mit einfachen Mitteln nicht erreicht werden kann. Um tatsächliche Feldverhältnisse zu simulieren, müssen selbstverständlich begleitend Lysimeterexperimente durchgeführt werden. Dies war auch bei allen wesentlichen Bauunternehmen der Vergangenheit der Fall. Es ist zumutbar, wenn 100.000 m³ Baumaterial bewegt werden, daß im Rahmen eines ein- oder zweijährigen Vorexperiments Auslaugversuche mit größeren Lysimetern unter realistischen Bedingungen erfolgen.

Ein Beispiel für die Untersuchung von Auslaugraten an primären und sekundären Baustoffen - unter anderem der MVA-Schlacke -, ist die Untersuchung, die in [73] wiedergegeben wird. Es wurden in 9 Lysimetern mit 1 x 2 x 0,75 m³ Inhalt über 2 Jahre die Auslaugung verschiedener Schlackenarten studiert. Der Wechsel von aerob zu anoxisch hängt ab von der Porosität des Materials und kann bei einer Schlacken- + Flugstaubmischung bereits in 50 cm Tiefe liegen. Reine Schlacken sind mit Sicherheit durchlässiger für den Luftsauerstoff; man muß daher die aerob-anoxisch-Grenze noch tiefer legen. Diese Grenze ist auch keine Konstante, weil sie von den Niederschlagsverhältnissen, der Temperatur und von der Aktivität der Mikroorganismen in der Schlackenschicht abhängt. Sicher ist, daß man auch an der

Seite der Lysimeter (Randeffekte) mit einer gewissen oxidierenden Schicht rechnen muß. Daher dürfte das Lysimeter im vorigen Beispiel, was seine Größe betrifft, an der unteren Grenze liegen.

Die interessanteste Arbeit auf diesem Gebiet ist wohl die von A.-M. FÄLLMANN und J. HARTLÉN [55]. Sie arbeiten mit einem Lysimeter von $3 \times 3 \times 1,2 \text{ m}^3$, das 14 t Material aufnehmen kann. Die ganze Anlage wird, um die Redox-Bedingungen sicherzustellen, unter Argongas betrieben. Parallel dazu wird ein Laborexperiment mit einer Säule von 20 cm Durchmesser und 1 m Länge ausgeführt. Auch hier wurden durch ein Schutzgas anoxische Bedingungen erzwungen. Die pH- und die Redoxpotential-Verläufe, also die wichtigsten die Chemie beschreibenden Größen, sind im Rahmen eines Auswaschvorganges, der bis zu einem Flüssig-Fest-Verhältnis von 4,0 ging, praktisch identisch. Größere Lysimeter ohne Schutzgas oder Säulen- oder Lysimeterexperimente unter Schutzgas sind also die Untersuchungsmethoden der Wahl, wenn man vergleichbare Ergebnisse zwischen Labor- und Feldexperiment bekommen möchte.

In [66] wird eine sehr sorgfältige Arbeit zum Vergleich von Flugstäuben, die mit Zement verfestigt wurden, dargestellt. Die Tests und die realen Ergebnisse stimmen in keiner Weise überein. Die Unterschiede bedürfen einer „Übersetzung“, wie der Verfasser von [66] angibt. Die Erklärung der Unterschiede ist speziell auf die Struktur von Flugstäuben abgestimmt. Es ist ohne Frage - für den Fall der Auseinandersetzung mit diesem Material - eine lesenswerte und wichtige Arbeit.

4. Nutzung und Deponierung von MVA-Rückständen

Etwa 90 % der Rohschlacke, die bei der Müllverbrennung anfällt, hat eine Korngröße unter 32 mm Durchmesser, so daß eine Verwendung in der Bauindustrie grundsätzlich möglich ist. Neben dieser direkten Nutzung erfolgt ein bautechnischer Einsatz nach Vermischung mit Zement, Asphalt und anderen Bindemitteln. Als wichtigste Einsatzgebiete gelten der Straßen- und Wegebau, Gehwege, Parkplätze und ausgedehntere Anwendungsbereiche wie Straßendämme und Erdbauarbeiten im weiteren Sinn.

Die Filterstäube enthalten wesentlich höhere auswaschbare Salzfrachten, deutlich höhere Gehalte an toxischen Stoffen und haben für eine bautechnische Nutzung weniger günstige Eigenschaften. Die Verbrennungstechnologie der MVA wird unter anderem dahingehend optimiert, daß Schlacken weitgehend schadstoffentfrachtet werden, die Filterstäube werden damit insbesondere zur Schadstoffsenke für Schwermetalle. Auf dem Gebiet der Nutzung von Filterstäuben werden zur Zeit Entwicklungsarbeiten durchgeführt (siehe Kapitel 5). Der größte Teil der anfallenden Filterstäube und ein Teil der Rohschlacken gelangen heute nach wie vor auf Deponien. Da die dicken Schichten, die bei der Deponierung anfallen, in ihrem Verhalten gegen Regenwasser durchaus vergleichbar sind mit dicken Schichten, wie sie zum Beispiel beim Dammbau aufgebaut werden, werden wissenschaftliche Untersuchungen an Deponien in die hier wiedergegebene Literaturrecherche einbezogen.

4.1 Nutzung im Straßen- und Wegebau

Die erste MVA, kombiniert mit einem Elektrizitätswerk, ging 1897 in London in Betrieb. In Deutschland folgten Anlagen in Kiel 1902, in Frankfurt am Main 1905 und in Barmen 1906. Bereits diese Anlagen lieferten große Mengen Schlacken, die als Baumaterial für Zwischendecken, als Wegeschüttungen und als Zusatz zu Mörtel und Beton benutzt wurden [24].

D. O. REIMANN schreibt 1994 [8] über die Nutzung von Schlacke als Baustoff nach einer mechanischen Aufbereitung und einer Abtrennung des Schrottanteils und der Überkornfraktion:

„Die Verwertung erfolgt in der Regel in nachfolgenden Einsatzgebieten:

- als untergeordnetes Baumaterial für: Lärmschutzwälle, Landschaftsbau, Unterbau, Dammbau, Bodenverbesserung, Erdbau, ungebundenen Verkehrsflächenbau
- als hochwertiges Baumaterial für: Frostschutz -, Schotter -, Trag- oder hydraulisch gebundene Tragschichten im Straßen- und Wegebau, Zuschlagstoffe für Bausteine u.ä.“

Die Eigenschaften von Schlacken erlauben fast ausnahmslos die Nutzung als untergeordnetes Baumaterial. Ist hochwertiges Baumaterial notwendig, wie z. B. bei Frostschutzschichten, kann die Zugabe anderer Zusatzstoffe notwendig sein, um die entsprechende Wasserdurchlässigkeit zu garantieren. Auch die Zugabe von Kalk zur Verbesserung der Puzzolanischen Reaktionen kann sich als sinnvoll erweisen. Zur Einhaltung der Raumbeständigkeit der Schlacken ist eine natürliche oder künstliche Alterung bei feuchter Lagerung erforderlich. Im wesentlichen geht es dabei um die Umwandlung von metallischem Aluminium in Aluminiumhydroxid und um die Auskristallisation von Sulfoaluminaten, also um Prozesse, die zu einer Volumensvergrößerung führen. In vielen Fällen wird im Straßenbau eine Überdeckung mit wasserundurchlässigen Schichten, wie z. B. Bitumen, durchgeführt. Dies reduziert den jährlich ausgewaschenen Anteil von Schadstoffen, wird aber auch aus optischen Gründen und zur Vermeidung von Staubfreisetzung angewandt. Eine Verbesserung der Schlacke im Bauwesen kann erreicht werden, wenn die Feinstfraktion kleiner 0,5 mm durch Siebung oder Windsichtung abgetrennt wird. Diese Feinstfraktion hat deutlich höhere Kohlenstoffgehalte als der Mittelwert. Dieser Anteil wird meist gemeinsam mit den Filterstäuben auf Deponien gelagert.

Neben drei weiteren wichtigen Arbeiten von D. O. REIMANN von 1992, 1989 und 1988 ist der Vortrag von H. SCHRÖDER auf der Tagung Müllverbrennung 1988 mit dem Titel „Die Entsorgung von Rückständen aus der thermischen Müllverwertung“ zu erwähnen [22]. Die Behandlung und der Einsatz bzw. die Verwertung von Rohschlacken aus MVA wird im wesentlichen gleich beschrieben wie in dem obengenannten Papier von D. O. REIMANN. Zur Verbesserung des direkten Einsatzes von MVA-Schlacken sagt er: „Das Endprodukt der Aufbereitungsmaßnahmen ist ein Baustoff mit definierten bautechnischen Eigenschaften. Diese bestimmen die Verwendungsmöglichkeit von MVA-Schlacken im Unterbau von Straßen und Wegen als

satz von Bindemitteln. Bei Bedarf wird den MVA-Schlacken Kesselschlackengranulat aus Steinkohlefeuerungsanlagen o. ä. zur Verbesserung der Drainagefähigkeit beigemischt. Durch Vermischung mit Zement und Bitumen kann eine Verwendung der MVA-Schlacken in Tragschichten höher belasteter Verkehrswege erreicht werden.“

Als begrenzenden Faktor für den Einsatz von MVA-Schlacken gibt H. SCHRÖDER an: „Über die Maßnahmen, die für eine geeignete Verwendung von MVA-Schlacken in Frage kommen, entscheidet das Rohstoffangebot und die Nachfrage nach Bauleistungen. Dies kann regional sehr unterschiedlich sein. Es ist zu beobachten, daß den örtlichen Erfordernissen entsprechend sich spezielle Bauweisen unter Verwendung von MVA-Schlacken herauszubilden beginnen. Die Bereitschaft des Marktes, das Angebot an MVA-Schlacken und der daraus abgeleiteten Bauweisen anzunehmen, darf nicht durch belastende Diskussionen über Grenzwerte verunsichert werden“ [22].

Eine weitere wichtige Arbeit zu diesem Thema stammt von A. TOUSSAINT mit dem Titel „Verwertung von Verbrennungsrückständen aus MVA im Straßen- und Wegebau“ von 1982 [23]. In dieser Arbeit werden wichtige Eigenschaften von Schlacken besprochen, wie die Korngrößenverteilung, die Frostbeständigkeit, mechanische Eigenschaften und Wasserdurchlässigkeit, also Eigenschaften, die eine Voraussetzung für bautechnische Nutzung darstellen. TOUSSAINT beschreibt die Nutzung von aufgearbeiteten Rohschlacken zur Befestigung von Wegen und wenig befahrenen Plätzen, für Tragschichten ohne Bindemittel, für bituminös und für hydraulisch gebundene Schichten.

N. KURTH weist 1984 auf die vorzügliche Verwendbarkeit von MVA-Schlacken im Straßen- und Wegebau hin. Um die notwendige Wasserdurchlässigkeit zu sichern, empfiehlt er die Zugabe von Granulaten, wie sie in Steinkohlekraftwerken bei der Verbrennung anfallen, im Verhältnis 30:70 zur MVA-Schlacke. Die Umweltverträglichkeit sieht er als gegeben an, wenn der Schlacke kein Filterstaub zugesetzt wird. Es wird abgeraten, metallische Leitungen in die Schlacken direkt einzubetten, wohl aber ist eine Unterschichtung und eine Überschichtung mit Schlacken möglich, ohne daß Korrosion auftritt [3].

Der Einsatz von MVA-Schlacken mit hydraulischen Bindern und Asphalt wird beschrieben in [25-27, 34-36]. Eine allgemeine Bejahung des Einsatzes von MVA-Schlacken im Straßenbau bzw. im Baugewerbe generell, erfolgt in den Arbeiten [15, 28-33, 44]. In diesen Arbeiten werden auch die bautechnischen Eigenschaften von Schlacken, die für solchen Einsatz notwendig sind, beschrieben.

In [5, 14, 22] wird darauf hingewiesen, daß der Einsatz von MVA-Schlacken mit einem Mindestabstand von Fließgewässern, grundsätzlich oberhalb des höchsten Grundwasserspiegels und nur außerhalb von Wasserschutzgebieten, empfohlen wird. Außerdem sollen Einsätze in potentiellen Überschwemmungsbereichen, nahe an Wassergewinnungsanlagen und über Kluft- und Porengrundwasserleitern vermieden werden (siehe auch Kapitel 6).

Viele Straßenbauprojekte wurden von Feldversuchen mit großen Lysimetern begleitet; es wurden wissenschaftliche Arbeiten während der Errichtung und oft bis viele Jahre danach durchgeführt [44, 45, 49, 86].

Von den Publikationen über Aktivitäten im Ausland ist der Abschlußbericht der International Ash Working Group, deutsches Mitglied JÜRGEN VEHLOW, der wichtigste Beitrag [19]. Diese Arbeitsgruppe hat ihre Aufgaben 89/90 aufgenommen. Auf Seite 57 heißt es: „In Europa wurde anhand vieler großer Nutzungsprojekte die Eignung der MVA-Schlacke für die Landgewinnung vom Ozean, Windschutzwälle, Lärmschutzwälle, Straßenbau, Parkplatzbau und Wegebau demonstriert. In den USA wurden viele Anwendungen abgeschlossen, wobei MVA-Schlacke in bituminöse Massen eingebettet wurde. Zusätzlich sind viele Projekte abgeschlossen oder geplant, in denen MVA-Schlacke benutzt wurde oder wird, zusammen mit Portlandzement, z. B. für eine Anwendung in Meeresriffen, Küstenschutzanlagen und Betonblöcken für Gebäude“. Einen Überblick gibt Tabelle 10.

In [40] wird ein ausgedehntes Straßenbauexperiment dargestellt. Die MVA-Schlackenschicht ist 1 m dick und der Straßenabschnitt 4,5 km lang. Insgesamt gelangten 400.000 t MVA-Schlacke zum Einsatz (Abb. 3). Ein deutsches Analogon wird in [49] dargestellt. In [49] wird auf Erfahrungen mit Dammbauten hingewiesen und ebenfalls angegeben, daß für größere Erdbaumaßnahmen die in einer MVA anfallenden Mengen zu klein sind. Der hier besprochene Damm ist ein Straßendamm, der mit über 600 m Länge mit 35.000 m³ MVA-Schlacke unterlegt wurde und später mit einer Asphaltsschicht abgedeckt wurde. Ein Querschnitt durch diesen Straßendamm ist aus Abb. 4 zu entnehmen. In [41] wird eine künstliche Insel beschrieben, die in Israel vor der Küste von Tel Aviv errichtet werden soll. Der Bereich oberhalb der Wasserlinie soll dabei mit MVA-Schlacke aufgefüllt werden.

Tabelle 10: Zusammenfassung über die Nutzung von MVA-Reststoffen nach Ländern [19]. Bottom ash = Rohschlacke. Fly ash = Flugstäube

| Country | Amount Utilized | Applications |
|---------------|---|--|
| Canada | <ul style="list-style-type: none"> Utilization currently not under development. | |
| Denmark | <ul style="list-style-type: none"> 420,000 tonnes of bottom ash produced annually. > 90% of bottom ash is utilized. | <ul style="list-style-type: none"> Granular sub-base for parking lots, bicycle paths, paved and unpaved roads. Large number of small projects. |
| Germany | <ul style="list-style-type: none"> ca. 50% of bottom ash is utilized. | <ul style="list-style-type: none"> Paving applications (primarily as a granular base). Pilot scale use of APC residue grout in coal mines (50,000 tonnes). |
| Netherlands | <ul style="list-style-type: none"> > 90% of bottom ash is utilized. > 2 million tonnes of bottom ash have been utilized. ca. 50% of fly ash is utilized. | <ul style="list-style-type: none"> Bottom ash use as granular base or fill in road base, embankments, noise and wind barriers. Bottom ash use as aggregate in asphalt and concrete. Fly ash use a fine aggregate in asphalt. |
| Sweden | <ul style="list-style-type: none"> Utilization of bottom ash is under development. Very limited utilization has occurred. | <ul style="list-style-type: none"> Pavement applications. |
| United States | <ul style="list-style-type: none"> Utilization programs are under development. Uncertainty over whether bottom ash only or combined ash will be utilized. | <ul style="list-style-type: none"> Bottom ash and combined ash being considered for use in paving applications (granular base and aggregate in asphalt), MSW landfill daily and final cover, aggregate in terrestrial and marine cement applications. |

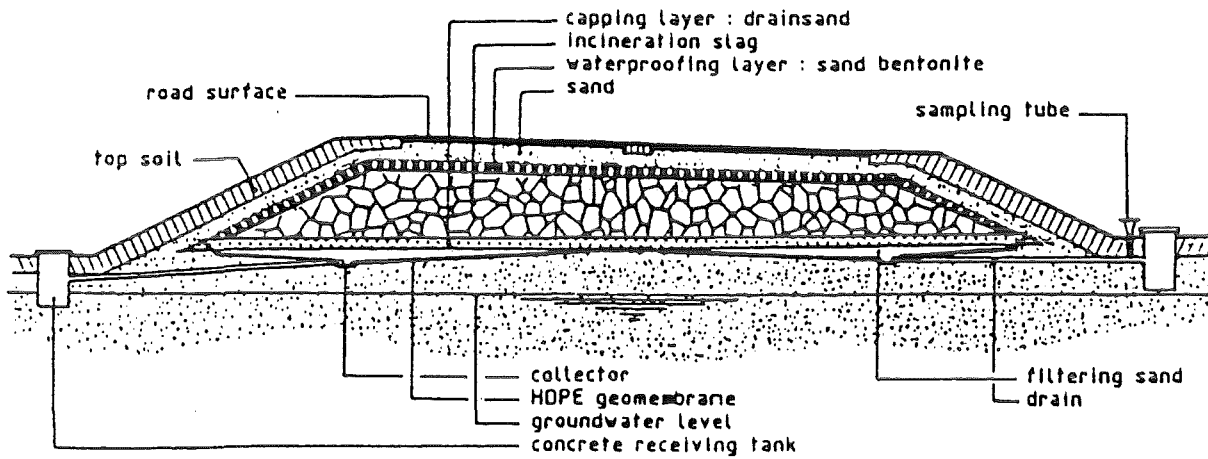


Abb. 3: Straßenbauprojekt bei Rotterdam [40]

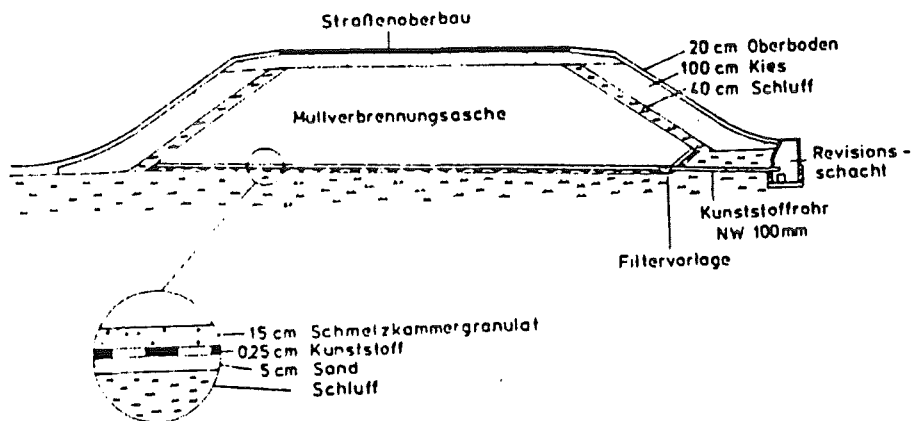


Abb. 4: Schematischer Aufbau des Dammes aus MVA-Schlacke mit Folienabdichtung im Geländetiefsten [49]

4.2 Deponien

Aus den vielen baulichen Anwendungen herausgehoben werden Deponien und Dämme, bei denen dicke Schlackeschichten und ihre Auswaschung und chemische Abläufe zu berücksichtigen sind. Ca. 40 % der MVA-Rohschlacken gehen auch heute noch in Deutschland auf Deponien.

Die hier wiedergegebenen Erfahrungen im Zusammenhang mit Aufbau und Betrieb von Deponien sind im Rahmen der Literaturrecherche nicht Hauptziel der Untersuchung gewesen. Da dicke Schichten sich sowohl auf einer Deponie als auch in einem Damm vergleichbar verhalten und umfangreiche Studien gerade an Deponien durchgeführt wurden, erschien es sinnvoll, die hier bereits sehr früh gesammelten Erfahrungen zu berücksichtigen [97].

1982 wurde in [42] ein Experiment veröffentlicht, das in der Zeit von 1978 bis 1980 in der Deponie Großmehring bei Ingolstadt vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz und der MVA Ingolstadt ausgeführt wurde. Die Auswertung lag in den Händen des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz. Ziel des Feldexperimentes war es, zu den bereits in großer Zahl vorliegenden Labor- und Säulenexperimenten Daten aus Feldexperimenten zu bekommen. In der Sekundärliteratur dieser Arbeit werden Auslaugversuche, Deponieverhalten und wichtige Eigenschaften von MVA-Schlacken beschrieben. Die Labor- und Säulenexperimente erfolgten in der Zeit von 1966 bis 1978. Das Deponie-Experiment in Großmehring sollte ursprünglich die Möglichkeit umfassen, Rohschlacke allein, Rohschlacke mit Filterstäuben und verfestigten Filterstäuben zu studieren. Da sich herausstellte, daß die Rohschlacke mit Filterstäuben grundsätzlich bereits straßenbaulich geeignet ist, wurde auf die anderen zwei Experimente verzichtet (wohl ein Standpunkt von 1982. H. Schüttelkopf). Auf einer Fläche von 6200 m² wurden die in der Ingolstädter MVA anfallenden Rohschlacken und Flugstäube, bereits in der Anlage vermischt, aufgebracht (Abb. 5). Die Abdichtung nach unten bestand aus 50 cm Lehm; über diesem Lehm befand sich eine Kiesschicht, in der in 15 m Abstand Drainagerohre installiert waren. Die Sickerwässer wurden in einem Sammelbecken erfaßt. Während des Experiments wurde fortgesetzt die in der MVA Ingolstadt anfallende MVA-Schlacke, der Flugstaub und ein vernachlässigbarer Anteil von Verbrennungsrückständen aus Klärwerksschlamm auf der Halde aufgefahren und festgewalzt. Das eigentliche Experiment begann im Dezember 1978 und endete im August 1980.

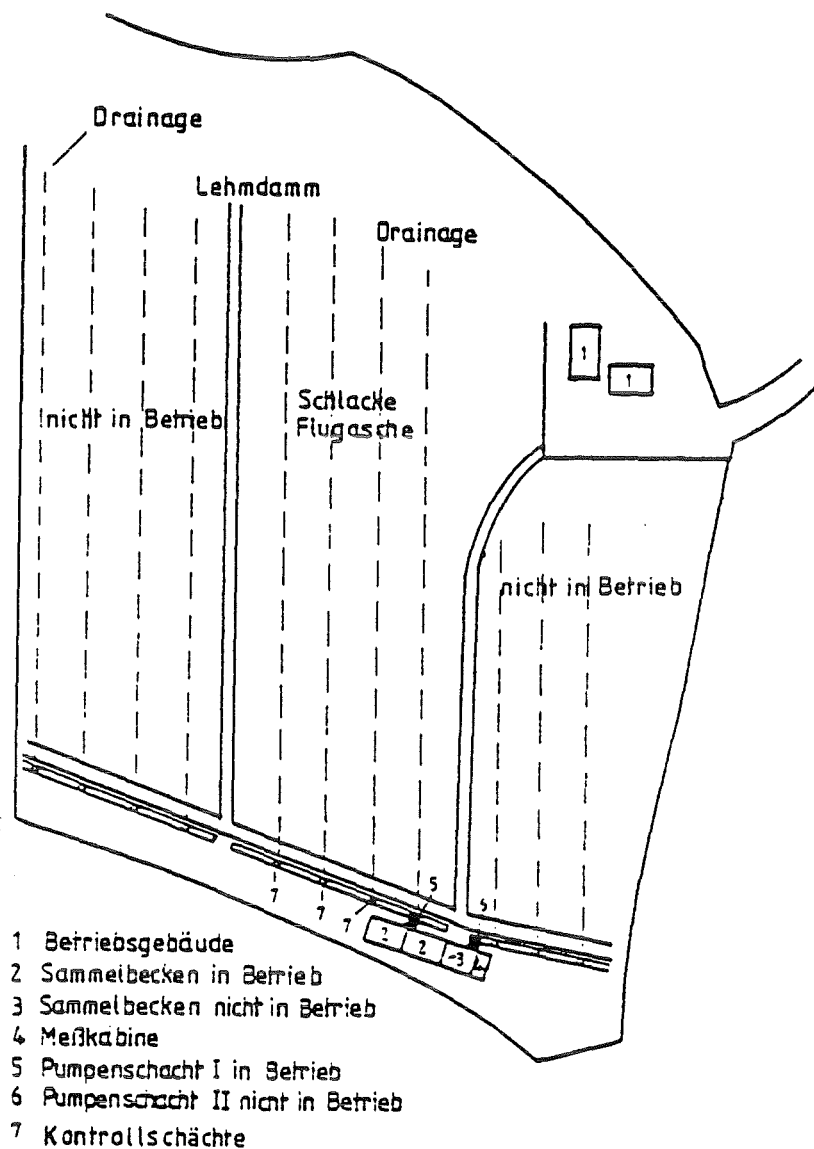


Abb. 5: Plan der Reststoffdeponie der MVA Großmehring [42]

Die Gesamtreststoffe, die sich zu diesem Zeitpunkt auf der 6.200 m² großen Fläche befand, betrug 72.441 t. Folgende Daten wurden gemessen: die Sickerwassermenge, die Temperatur des Sickerwassers, die Niederschlagsmenge, die Luftfeuchte und Lufttemperatur. Im Sickerwasser wurde der pH, die Leitfähigkeit, der Abdampfdruck, der Glühverlust des Abdampfdrucks, der Trübstoffgehalt, der Geruch und die Farbe festgehalten. Außerdem wurden der Sauerstoff- und der Kohlenstoffgehalt, die Anionen Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, S⁻ und F⁻ gemessen. An Kationen wurde NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ und Al³⁺ erfaßt. Die Schwermetalle, die in der filtrierten Lösung erfaßt wurden, waren Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb und Hg. An den Rohschlacken wurde gemessen: der Wassergehalt, die Korngrößenverteilung, die Auslaugbarkeit nach DEV S4 und die chemische Zusammensetzung.

Von den außergewöhnlich großen Datenmengen sind folgende Sachverhalte von besonderer Bedeutung: Der pH-Wert des Sickerwassers lag zwischen 7,6 und 10,2. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Laborwert der Schlackenauslaugung von 12,5 bis 12,9. Es wurde angenommen, daß die Neutralisation durch Kohlensäure erfolgt. Für die Herkunft der Kohlensäure wurde biologische Tätigkeit angenommen, da bei hoher Temperatur des Sickerwassers ein niedriger pH und bei niedriger Temperatur ein hoher pH beobachtet werden konnte. Der Temperaturverlauf im Sickerwasser entsprach im wesentlichen der Umgebungstemperatur.

Der Eindampfrückstand des Sickerwassers lag im Durchschnitt bei 30 g/l. Davon waren:

- Cl^- 8,5 - 19,6 g/l
- SO_4^{2-} 0,17 - 0,5 g/l
- Na^+ 2,2 - 8,2 g/l
- K^+ 2,7 - 10,0 g/l
- Ca^{2+} 0,09 - 1,36 g/l

Die anderen Anionen und Kationen waren von untergeordneter Bedeutung.

Die Gehalte der Schwermetalle lagen ausnahmslos deutlich unter 1 mg/l. Die höchsten Konzentrationen wiesen Pb und Ni mit 0,2 und 0,1 mg/l auf. Dies ist in Übereinstimmung mit der bei den pH-Bedingungen schlechten Löslichkeit der Hydroxide, Oxide und Carbonate. Relativ bald nach dem Beginn des Experiments begann das Sickerwasser nach H_2S zu riechen. Es wurde angenommen, daß der eigentliche MVA-Schlackenkörper anoxisch geworden war und Mikroorganismen die reichlich vorhandenen Sulfate zu Schwefel und S^{2-} reduziert hatten. Diese Sulfide dürften zu einer weiteren Abnahme der Löslichkeit der Schwermetalle beigetragen haben. Dies führt zu einer durchaus erwünschten Vererzung der Deponie unter Fixierung der Schwermetalle als schwer lösliche Sulfide.

Aus den Experimenten geht hervor, daß die gemeinsame Lagerung von Flugstaub und Rohschlacke auf einer Deponie und eventuell auch in größeren baulichen Projekten gerechtfertigt ist. Die Konzentrationen im Sickerwasser erlauben eine direkte Abgabe in die Kanalisation oder bei entsprechender Dimension direkt in einen Vorfluter. Da in Zukunft mit ansteigender Nutzung der MVA-Schlacke (in der Regel ohne Flugstäube) zu rechnen ist, erhebt sich die Frage nach der Deponierung von Flugstaub. Die Deponierung auf Sondermülldeponien wird nicht für notwendig gehalten; es erscheint ganz allgemein als angemessen, daß die Flugstäube auf Hausmülldeponien verbracht werden. (Auch dies sind wohl Ansichten von 1982, denn heute werden Flugstäube unter besonders strengen Auflagen in aufgelassenen Bergwerken wie z. B. in Heilbronn deponiert, H. Schüttelkopf).

J. GIGLBERGER stellt in [28] noch einmal, basierend auf den Erfahrungen mit der Mülldeponie in Großmering, den bayerischen, positiven Standpunkt zum Einsatz von MVA-Schlacke als Sekundärbaustoff dar. Als Abschluß seiner Betrachtung weist er darauf hin, daß der Einsatz in Lärmschutzwällen grundsätzlich gerechtfertigt ist, fordert aber einen Lärmschutzwall, der als Modellanlage einer systematischen Untersuchung unterzogen werden kann.

In den beiden 1994 erschienenen Publikationen [6, 89] werden detaillierte Angaben gemacht zu den gesetzlichen und technischen Regelungen bei Schlackeverwertung und -entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland und zu dem Bau von MVA-Reststoff-Deponien.

Die Besonderheiten des Verhaltens von MVA-Filterstäuben und die speziellen Bedingungen ihrer Deponierung werden in [43] untersucht. In [22] werden die Ergebnisse beschrieben, die mit drei Versuchfeldern mit den Basisabmessungen $8 \times 8 \text{ m}^2$ gewonnen wurden. Wichtig bei der Deponierung von Filterstäuben ist die dichte Lagerung, die Reduzierung der Porosität auf ein Minimum, um damit die Auswaschung der von bis zu 30 % löslichen Anteile weitgehend zu reduzieren. Eine Verfestigung der Filterstäube mit Zement ist nicht in jedem Fall notwendig, reduziert aber den auswaschbaren Anteil ganz wesentlich. Chemische Reaktionen und Auswaschung können zur Rißbildung führen und damit zu einer beschleunigten Elution der löslichen Inhaltstoffe.

Eine außergewöhnlich interessante dänische Arbeit wird in [46] wiedergegeben. An 4 Halden, 2 ausschließlich mit MVA-Rückständen und 2 mit MVA-Rückständen und anderem abgelagerten Gut, wurden Sickerwasseruntersuchungen durchgeführt. Die Schichtdicke des abgelagerten Materials liegt zwischen 9,5 und 18,5 m, die abgelagerten Mengen zwischen 10.000 und 241.000 m^3 . Die Beprobung und Analyse der Eluate erfolgte über mindestens 5 und bis zu 16 Beobachtungsjahren. Die Publikation stammt aus dem Jahr 1989. Außergewöhnlich interessant sind die Cl-Freisetzungen. Innerhalb von 8 Jahren nahmen sie nur um den Faktor 2 ab. Die Sulfatwerte waren über die gesamte Beobachtungszeit gleichbleibend niedrig.

In [4] werden folgende Kosten angegeben: 20 DM/t für Kies und Schotter, 60 DM/t als Deponiekosten und 9 - 20 DM/t für die Aufbereitung von MVA-Rohschlacke zum Sekundärbaustoff.

4.3 Lärmschutzwälle und andere große Erdbaumaßnahmen

In [47] wird empfohlen, MVA-Reststoffe für Damm- und andere Erdbaubereiche zu nutzen. Da MVA-Schlacke 10 bis 35 % spezifisch leichter ist als Sand, kann dieses Material besonders dann eingesetzt werden, wenn eine geringe Belastung, speziell bei setzungsfähigem Untergrund, wünschenswert ist.

In [23] von 1982 wird angegeben, daß entsprechende Bauten in der Bundesrepublik nicht bekannt sind. Nach Erfahrungen in Österreich wird gefordert, daß die abbaufähigen, organischen Anteile $< 5 \%$ sein müssen. Die Verdichtbarkeit von Schlacken, verglichen mit anderen Baumaterialien, ist kleiner, die Verzahnung der Einzelteilchen deutlich besser. Es wird darauf hingewiesen, daß in der Praxis eine MVA üblicherweise nicht genügend Material liefert, um eine größere Erdbaumaßnahme mit Material zu versorgen. Die Alternative, eine Mülldeponie anzulegen und Material zu sammeln bzw. durch Transporte von anderen MVA heranzubringen, lohnt sich oft nicht.

In [28] von 1982 fordert J. GIGLBERGER die Errichtung eines Lärmschutzwalles mit der Möglichkeit, experimentelle Studien daran auszuführen. Dieser Lärmschutzwall wurde offensichtlich im Süden von München bei Unterharching errichtet. Die Arbeit, in der D. HOLL seine Ergebnisse beschreibt [48], war bisher nicht zu beschaffen. In [5] gibt ein unbekannter Verfasser eine Zusammenfassung einer Tagung von November 1987, die vom Bundesverband der Baustoffaufarbeiter e. V. in Frankfurt veranstaltet wurde. D. HOLL hatte bei dieser Veranstaltung über einen Lärmschutzwall im Süden von München vorgetragen. 2 Jahre wurden Grundwasserproben entnommen und der pH, die Leitfähigkeit, der Nitrat- und der Schwermetallgehalt gemessen. Die MVA-Schlacke war teilweise mit Flugstaub gemischt. „Es war kein schlüssiger Zusammenhang zwischen den festgestellten Konzentrationschwankungen und dem Lärmschutzwall aus Müllschlacke zu erkennen“.

H. SCHRÖDER [22] beschreibt Einschränkungen für den Einsatz von MVA-Schlacken und gibt an, daß durch die notwendigen zusätzlichen Überdeckungen bei einem Lärmschutzwall (das Modell ist aus Abb. 6 zu entnehmen), nur 50 % des Volumens mit MVA-Schlacke aufgefüllt werden können. Er betrachtet MVA-Schlacke als wirtschaftlichen Negativwert und als nicht konkurrenzfähig, wenn Transportkosten zusätzlich berücksichtigt werden müssen.

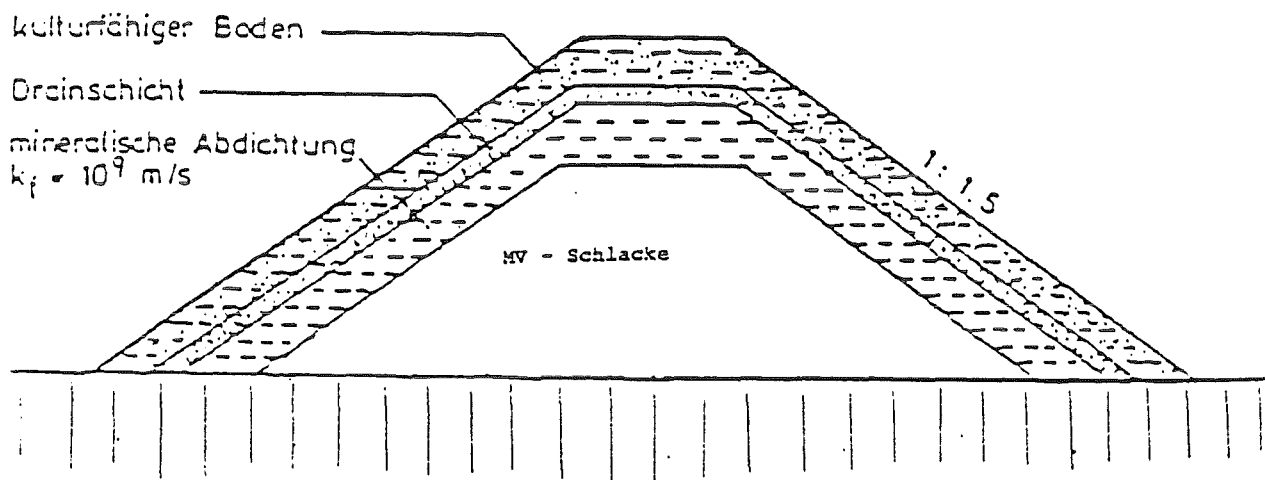


Abb. 6: Querschnitt eines Lärmschutzwalles bei Verwendung von MVA-Schlacke [22]

In [50] werden 1991 Planungsdaten für einen Deich beschrieben (Abb. 7), der zu wesentlichen Teilen aus MVA-Schlacke bestehen soll. In [15] wird 1992 abermals die Eignung von MVA-Schlacken für den Dammbau ganz allgemein bestätigt.

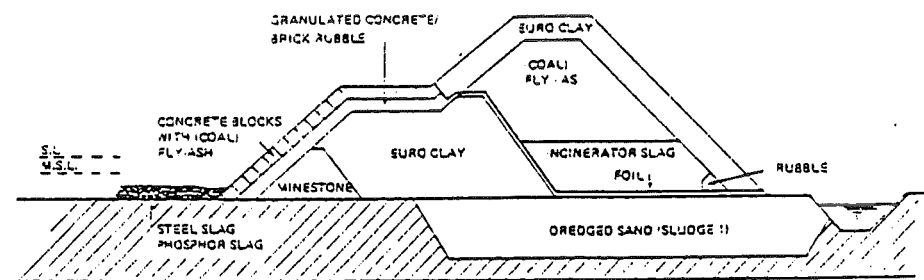


Abb. 7: Entwurf für einen „alternativen“ Deich [50]

Der zweite in der Bundesrepublik errichtete Lärmschutzwall wurde von K. MESTERS, Bochum, im Rahmen seiner Doktorarbeit [7] und einigen folgenden Publikationen beschrieben. Das Konzept wird in Abb. 8 angegeben. Der Damm ist 7 m breit und 50 m lang und 1.500 t MVA-Schlacke wurden ohne Flugstaub, aber teilweise mit Granulaten aus der Kohleverfeuerung vermischt, eingebaut. Die gesamte Dammlänge wurde in vier experimentell nutzbare Teile geteilt. Neben dem Material in München, MVA-Schlacke + Filterstaub und hier im wesentlichen MVA-Schlacke, ist der wichtigste Unterschied, daß MESTERS besonders interessiert war am Energie- und Wasserhaushalt des Dammes. Daher geht eine umfangreiche theoretische Arbeit der eigentlichen experimentellen Untersuchung voraus. Die später durchgeführten Messungen zielen vor allem auf ein gutes Verständnis des Verhaltens von Wasser im Damm und auf die Möglichkeit einer Bilanzierung ab.

Im Rahmen des DEV-S4-Tests wurden pH-Wert, Leitfähigkeit, Chlorid, Sulfat, EOX, TOC und Abdampfrückstand gemessen. Außerdem lagen unter der Nachweisgrenze EOX, alle Schwermetalle, der CSB-Wert, Arsen, Ammonium und Zyanid. Die im Eluat gemessenen Werte für die wichtigsten Anionen lagen bei 135 mg Cl⁻/l und bei 515 mg SO₄²⁻/l. Die Sickerwässer wurden in der Zeit von Dezember 1988 bis Juni 1991 untersucht. Die Anionen Chlorid und Sulfat erwiesen sich als die mengenmäßig bedeutendsten Sickerwasserkomponenten. Chloridkonzentrationen, die in den 130 Wochen beobachtet wurden, lagen zwischen 2000 und 8000 mg/l. Die Konzentration nahm während des Beobachtungszeitraum mit deutlichen Schwankungen ca. um den Faktor 2 ab. Die Sulfatwerte lagen zwischen 1900 und 4000 mg/l, und eine Abnahme konnte nur im Versuchsabschnitt D festgestellt werden. Der Abdampfrückstand lag im Bereich von 9 bis 15 g/l und nahm über die Beobachtungszeit ebenfalls ab. Außer diesen Daten wurde der pH, die elektrische Leitfähigkeit, der Ammonium-, der Zyanid- und der Fluoridgehalt gemessen. Für Kupfer und Zink erhielt man Meßwerte über der Nachweisgrenze. Chlorid, Sulfat und Abdampfrückstand sind zwar deutlich niedriger als die in der Mülldeponie Großmehring gemessenen Werte, aber wenn man berücksichtigt, daß MVA-Schlacke einer wesentlich moderneren Anlage von MESTERS benutzt wurde und außerdem kein Filterstaub in den Damm eingebaut war, ist die Differenz zwischen den Meßwerten vergleichsweise gering.

An dieser Stelle soll erwähnt werden, daß der Bau eines Lärmschutzwalles oder ganz allgemein der Einsatz von MVA-Schlacke im Erdbau gewissen zusätzlichen Auflagen unterworfen ist. Dazu gehört eine Abdichtung nach unten, aber vor allem eine Abdeckung nach oben, die aus einer mineralischen Abdeckung, z. B. Ton, einer Drainageschichte und einer angemessen dicken Muttererdeschichte besteht. Ziel ist, auf diese Weise das Eindringen von Niederschlagswasser in den Lärmschutzwall nennenswert zu erschweren bzw. unmöglich zu machen.

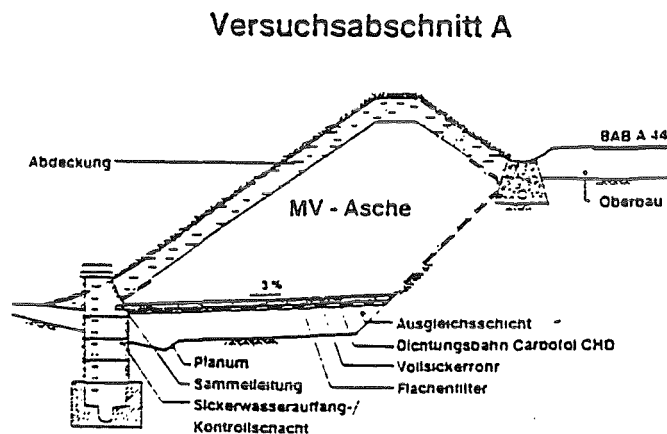


Abb. 8: Dammkern aus MVA-Schlacke mit einer Abdeckung aus 40 cm kulturfähigem Boden (Auelehm) [7]

5. Möglichkeiten der Immobilisierung von Schadstoffen und der Verminderung von Schadstoffgehalten

Eine ausgezeichnete Beschreibung der verschiedenen Möglichkeiten der Verminderung der auslaugbaren Schadstoffe in MVA-Rohschlacken gibt D. O. REIMANN [8, 64]. Zu den Maßnahmen gehören:

- Verringern, Substituieren und Verboten kritischer Inhaltsstoffe in den Produkten, die über den Abfallpfad die Schlackenqualität besonders negativ beeinflussen,
- Verbesserung der Schadstofftrennschärfe durch optimierte Feuerung und feuerungsinterne Maßnahmen, um organische und hochflüchtige Schadstoffe weitgehend aus der Schlacke auszutreiben,
- Mechanische Aufbereitung und Trennung der schadstoffhaltigen Fraktionen der Schlacke, wozu insbesondere die Feinstfraktion gehört,

- Behandlung der Schlacke mit gezielter Auslaugung und Verringerung oder Immobilisierung der kritischen Schadstoffe durch chemische Reaktionen, Additivzugaben o. ä.,
- Sintern und Schmelzen der Schlacke zur Trennung bzw. Immobilisierung der enthaltenen kritischen Schadstoffe und zur Qualitätsverbesserung.

Zu den Präventivmaßnahmen gehört die Vermeidung der Stoffe, die z. B. Cu, Pb, Cd und evtl. auch Ni in das Verbrennungsgut einbringen. In jedem Fall gehören dazu chlor- und in gewissem Umfang schwefelhaltige Stoffe.

Zur Optimierung der Feuerung gehört die entsprechende Wahl der Verbrennungstemperatur, die richtige Umwälzung am Rost und die Turbulenzen in der Feuerung [95, 96]. Beim Betrieb mit ausreichend langen Aufenthaltszeiten und mit geringem Luftüberschuß erreicht man eine weitgehende Abtrennung von Hg, Cd, Cl und As und eine nennenswerte Abtrennung von Pb, Zn, S und F. Beim Sintern und Aufschmelzen unterscheidet man interne - also im Rahmen der Müllverbrennung ablaufende wie Sintern und Aufschmelzen - und externe Verfahren. Von der Wirtschaftlichkeit sind die internen Verfahren vorzuziehen. Das Schmelzbrennverfahren und die Hochtemperaturvergasung bei Temperaturen > 2000 °C führen zu einer exzellenten Schlacke mit geringen Mengen kaum auswaschbarer Schadstoffe. Das externe Aufschmelzen führt zu einem nennenswerten zusätzlichen Energieaufwand. Interessant in diesem Zusammenhang sind externe Sinterprozesse, die zwischen 850 und 950 °C zu Produkten führen, die eine stark verringerte Auslaugung haben. Bei etwa 1000 °C kann aus Sulfaten durch Reduktion H₂S entstehen, das die Metalle als Sulfide bindet und ihre Auslaugbarkeit nennenswert reduziert. Über das Langzeitverhalten solcher Produkte ist allerdings wenig bekannt.

In [75] wird das Verhalten von Schlacken beschrieben, die bei Temperaturen zwischen 620 und 970 °C in der Verbrennungsanlage behandelt wurden. Cd, Pb und Zn waren in hohem Maße flüchtig; der Kohlenstoffgehalt sank stark.

In [57] werden zwei Konzepte der Rohschlackenwäsche, wie sie von der Firma NOELL betrieben wird, dargestellt. Als Parameter wurden variiert: die Zeit im Entschlacker, die Temperatur der Waschlösung, das Flüssig-Fest-Verhältnis und der Einfluß zusätzlicher Energiezuführung auf die Auslaugungsergebnisse. Die Gleichgewichtseinstellungen sind nach wenigen Minuten beendet, und der Abbau der Cl⁻ und der Schwermetallkonzentrationen - gemessen durch den DEV-S4-Test - ist eindrucksvoll.

In [64] wird die Auswirkung auf den Cl⁻-Austrag durch ein langjährig bewährtes Verfahren der Rohschlackenwäsche in der MVA Bamberg beschrieben. Der Austrag von Cl⁻ und organischen Schadstoffen ist nennenswert, der der Schwermetalle weniger ausgeprägt. Interessant ist die Nutzung des dabei entstehenden Abwassers, das nicht direkt in den Vorfluter eingeleitet werden kann. Es wird genutzt im Rahmen der Rauchgasreinigung, der Kalkmilchansetzung und der Rauchgaskühlung. Die Trinkwassergrenzwerte der mit diesen Schlacken erhaltenen Eluate werden teilweise weit unterschritten. In [76] werden niederländische Erfahrungen mit gezielter Schlackenwäsche beschrieben.

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Verringerung der Auslaugbarkeit bestimmter Schadstoffe ist die Alterung. Diese Alterung wird in jedem Fall vorgenommen, um bestimmte bautechnische Eigenschaften zu verbessern. In [77] wird gezeigt, daß bei einer Lagerung von einem Jahr die Auslaugbarkeit verschiedener Schadstoffe um 50 bis 70 % reduziert wird. Die Auslaugbarkeit von Cu und Mo wird um 80 bis 85 % verringert. Auch in [45] wird die heute generell genutzte Alterung von Schlacken über einen Zeitraum von 4 bis 12 Wochen als unbedingt notwendig gefordert.

Die effektivste Methode, die zur Verringerung der Auslaugbarkeit von Schadstoffen führt, ist die Vermischung von MVA-Schlacken mit verschiedenen Bindemitteln wie Asphalt, Zement, Kunststoffen usw. [82, 84, 85]. In [30] weisen die Verfasser darauf hin, daß die längere Lagerung des Produkts sich in jedem Fall positiv auswirkt auf die Eluierbarkeit von Schadstoffen, daß der Zusatz höherer Zementmengen dazu führt, daß der pH langsamer sinkt und dies sich ebenfalls positiv auswirkt auf die Auslaugung von Schadstoffen. Ebenso gilt dies für einen geringen Gehalt an Auswaschbarem generell. Negativ wirkt sich nach seinen Ausführungen der Gehalt von metallischem Aluminium und ein zu niedriger Wassergehalt im Material aus. In [78] werden vier Verfestigungstechnologien und die physikalischen und Auslaugeigenschaften der so entstehenden Produkte beschrieben. In [79] werden zwei industrielle Verfestigungskonzepte beschrieben. Das erste führt zu einem zementartigen Material; das zweite zu einem Stoffgemisch mit hohem Tobermoritanteil. In [80] wird die Fixierung mit zwei speziellen Bindematerialien beschrieben. In den meisten Fällen wurden die Verfestigungsmethoden, deren Konzept nur sehr ungenau angegeben wird, von Industriefirmen ausgearbeitet.

Auch Methoden zur Fixierung von Filterstäuben aus MVA werden beschrieben. Die erste Methodik stellt eine Aufschmelztechnik dar und beschreibt außerdem die Einbringung von Filterstäuben in Produkte, die später zur Ziegelproduktion benutzt werden. Die zweite Technik ist eine Einbringung der Filterstäube in verschiedene Bindemittel. In allen Fällen wird die stark verringerte Eluierbarkeit der Schadstoffe untersucht [24, 81, 87].

6. Gesetzliche Rahmenbedingungen

Der gesetzliche Rahmen wird in der Bundesrepublik Deutschland durch das Abfallgesetz [92], die TA Siedlungsabfall [91], das LAGA Merkblatt 1994 [90] und durch das Bundesimmissionsschutzgesetz [93] gegeben. Die wichtigsten dadurch aufgestellten Rahmenbedingungen werden in [6] beschrieben. In der zu dieser Literaturstelle gehörenden Sekundärliteratur sind praktisch alle für die Bundesrepublik wichtigen Papiere angegeben. Wichtige Grenz- und Richtwerte für das Trinkwasser und andere Wässer werden in den Arbeiten [64, 74] angegeben. Wichtige gesetzliche Grundlagen sind auch in der Literatur zu [7, 14, 23, 25] enthalten.

7. Schlußfolgerungen

In den Schlußfolgerungen soll bewertet werden, welche Bereiche des MVA-schlacken-Einsatzes in der Umwelt noch Forschungsbedarf haben und welcher Anteil dieses Forschungsbedarfes im FZK erbracht werden kann.

7.1 Relative Bedeutung der mineralisierten Reststoffe in Deutschland

Als Reststoffe der Bauindustrie fallen jährlich bis zu 126 Mt in der Bundesrepublik Deutschland an. Etwa die Hälfte dieses Materials wird als Sekundärbaustoff genutzt. Im Rahmen der Kohlegewinnung fallen 65 Mt/a als Nebengesteine an. Nur 20 % davon werden z. Zt. genutzt. Um Deponieraum zu sparen, wäre es daher am sinnvollsten, die Reststoffe der Bauindustrie und die Nebengesteine der Kohlenproduktion zu rezyklieren. Forschungsbedarf besteht in diesem Bereich in der Organisation der Rezyklierung und auf bautechnischem Gebiet. Siehe dazu die Auszeichnung von zwei Doktorarbeiten an der Universität Karlsruhe (BNN, 16.6.1995).

Schlacken aus Großfeuerungsanlagen und Schlacken aus der Hüttenindustrie fallen mit 17 Mt/a und 15Mt/a an. Diese Produkte werden bereits nahezu quantitativ wieder verwendet. Es folgen, vom Mengenanfall gesehen, verschiedene feste Industrieabfälle, 5 Mt/a, und dann die mineralisierten Reststoffe der Müllverbrennung mit ca. 3 Mt/a. Von letzteren werden ca. zwei Drittel bereits wieder verwendet. Die verbleibende 1 Mt/a erscheint als eine unbedeutende Komponente im Gesamtanfall mineralisierter Reststoffe. MVA-Reststoffe scheinen daher im ersten Moment als Modellmaterial für Immobilisierung und als wissenschaftliche Zielsubstanz von untergeordneter Bedeutung.

Zur Zeit fallen in der Bundesrepublik bis zu 47 Mt/a Hausmüll und hausmüllähnlicher Reststoffe an. Wegen der systematisch ausgebauten Müllvermeidung und der effektiver werdenden Sortierung und Aussonderung von Wertstoffen im Vorfeld dürfte die hier angegebene Menge ein Maximalwert - auch für die Zukunft - sein. Ein Viertel dieser Stoffe geht z. Zt. in die MVA. Dabei fallen 3 Mt/a an mineralisierten Reststoffen an. Zwei Drittel gehen in den Straßenbau, und ein Drittel gelangt auf Deponien. In Ländern mit vorbildlicher Müllbehandlung wie die Schweiz und Japan werden z. Zt. ca. 80 % des anfallenden Hausmülls Verbrennungsanlagen zugeführt. Dies dürfte auch organisatorisch der maximal erfaßbare Anteil sein. Unter der Annahme, daß nach der Errichtung von MVA in den fünf neuen Ländern und einem weiteren Ausbau der Müllverbrennung in den alten Bundesländern ein ähnlicher Wert erreicht wird, kann grob mit ca. 10 Mt/a als mineralisierte Reststoffe gerechnet werden. Neun Zehntel davon sind Rohschlacke und ein Zehntel Flugstäube. Diese Produktmengen sind in keinem Fall mehr zu vernachlässigen und beanspruchen beachtlichen Deponieraum in jedem Jahr. Dazu kommt, daß die Errichtung von Deponien für diese Produkte, die teilweise hohe Konzentrationen von toxischen oder anderen Schadstoffen enthalten, wesentlich teurer ist als die Errichtung einer Deponie für Bauschutt. MVA-Schlacke ist für die Immobilisierungsforschung daher ein sinnvolles Modell- und eine wichtiges Zielmaterial.

7.2 Einsatz von MVA-Reststoffen im Straßen- und Wegebau

Der Einsatz von MVA-Schlacke im **Straßen- und Wegebau** ist durch folgende Punkte gekennzeichnet: Es werden im allgemeinen dünne Schichten von weniger als einem halben Meter aufgetragen. Diese werden durch wasserundurchlässige Schichten abgedeckt. Sickerwasser, angereichert mit Schadstoffen aus der MVA-Schlacke, fällt praktisch nicht an, oder die Konzentrationen sind vernachlässigbar niedrig. Damit ist sichergestellt, daß negative Auswirkungen der in den MVA-Schlacken enthaltenen Stoffe während des Betriebes von Straße, Parkplatz, Gehweg usw. nicht auftreten können.

Nach Aufbruch der Straßen würde die Schlacke aber wieder einer Niederschlagsbeeinflussung ausgesetzt werden. Abgesehen davon, daß die dünnen Schichten an sich keinen Aufbau von hohen Konzentrationen im Sickerwasser erlauben würden, erfolgt während der Lagerung der Schlacken eine systematische Alterung, die nach etwa 10 Jahren zu Elutionswerten führt, die Böden entsprechen, wie sie z. B. mit gewisser Vorbelastung in Großstädten anzutreffen sind. Die Nutzung von vorgealterten, ausgeheizten und gewaschenen Schlacken im Straßen- und Wegebau ist daher uneingeschränkt zu bejahen.

7.3 Dicke Schichten von MVA-Schlacken auf Deponien und in Erdbauwerken

Auf **Deponien oder in Erdbauwerken** werden dicke Schichten von MVA-Schlacken oft bis zu 10 m aufgetragen. Durch Niederschläge fällt Sickerwasser an, das hohe Konzentrationen an Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{++} und Mg^{++} aufweist. Die Konzentrationen von Schwermetallen sind meist sehr niedrig, da das in großen Mengen vorhandene Sulfat zu Sulfid reduziert wird und die Sulfidfällung der Schwermetalle zu einer natürlichen Vererzung führt. Diese extrem unlöslichen Sulfide werden dann auch kaum ausgewaschen. Die Auswaschung der Problemstoffe Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{++} und evtl. anderer hält über Jahre an und reduziert sich nur in geringem Ausmaß. Die Auswaschung durch die Sickerwässer wird vermieden, indem unter den Schichten eine entsprechend dicke Tonlage angebracht wird, darüber ein drainagefähiges Material; und in vielen Fällen wird eine ähnliche Abdeckung auch an der oberen Seite durchgeführt. Durch solche, sehr kostspielige, Maßnahmen wird die aktuelle Auswaschung des Materials verhindert. Durch Setzungen, Temperatureinflüsse, Verschiebungen usw. werden die Tonschichten aber Risse bekommen, und spätestens, wenn ein Abbau oder Umbau an diesen Stellen erfolgt, werden Teile der MVA-Schlacken freiliegen. Die dann noch immer mögliche Auswaschung, die bei dicken Schichten nicht vernachlässigt werden kann, wird beginnen. D. h. die teuren Maßnahmen führen nur zu einer Verzögerung der Auswaschung um eventuell 50 bis 100 Jahre. Maßnahmen, die auf kostengünstige Art solche Auswaschungen für unbegrenzte Zeit vermeiden, wären wünschenswert. Auf diesem Gebiet existiert nennenswerter FuE-Bedarf.

7.4 Analyse der Zusammensetzung und Auslaugeigenschaften von MVA-Schlacken

Die grobe Zusammensetzung (Glas, Metall, Schlacke usw.), die chemische Charakterisierung und die Bestimmung der baulichen Qualität erfolgen routinemäßig in allen MVA und Schlackenaufbereitungsbetrieben. Ein FuE-Bedarf existiert nicht.

Die mineralogischen Untersuchungen an Schlacken sind nach unserer Literaturrecherche nur relativ selten erfolgt. Die Ergebnisse streuen auch in weiten Bereichen. Mineralogische Kenntnisse von den Schlacken haben große Bedeutung im Rahmen der Veränderung der Feuerungstechniken, der sich ändernden Zusammensetzung des Mülls, bei der Frage, eventuell Zuschlagstoffe dem Müll zuzusetzen, um danach Schlacken mit geringer Auslaugbarkeit zu erhalten. Ganz allgemein sind Fragen des Langzeitverhaltens und der Immobilisierung mit mineralogischen Untersuchungen verbunden. Es existiert FuE-Bedarf, der im FZK abgedeckt werden kann und zum Teil bereits abgedeckt wird.

Eine wichtige Prüfung der MVA-Schlacke ist der Elutionstest. Der einzige in Deutschland offiziell zugelassene Test ist der DEV-S4, bei dem 100 g Probematerial mit 1 l Wasser über 24 Stunden bei Raumtemperatur geschüttelt wird. Der Test ist ohne Frage sehr simpel, er ist unempfindlich auf Eigenschaftsunterschiede der MVA-Schlacken und liefert Informationen, aus denen nur wenige weiterführende Schlüsse gezogen werden können.

In vielen europäischen Ländern wird das Elutionsverhalten von MVA-Schlacken auf z. T. durchaus raffinierte Art untersucht. Tests, bei denen mit verschiedenem pH gearbeitet wird, wie Säulentests, Experimente, bei denen das Flüssig-Fest-Verhältnis verändert wird, existieren und sind in der Bundesrepublik Deutschland nur offiziell einzuführen.

Die oben beschriebenen Verfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens erlauben keine Aussagen, wenn pH-Veränderungen, Redoxpotentialveränderungen und bakterielle Tätigkeit zu berücksichtigen sind. Große Bauvorhaben wurden praktisch ausnahmslos durch Untersuchungen an großen Lysimetern begleitet. Die so erhaltenen Ergebnisse sind realistisch und der Aufwand zumutbar.

Lysimeter- und Säulenexperimente unter Schutzgas sollten in diesem Zusammenhang ausgebaut werden, ganz besonders dann, wenn Elutionen in Abhängigkeit vom pH und vom Redoxpotential studiert werden sollen. Lange Wartezeiten, bis ein Lysimeter ein anoxisch/aerobes-Gleichgewicht und ein pH-Gleichgewicht eingestellt hat, könnten damit vermieden werden. Die Tatsache, daß mit einem Säulenexperiment von 1 m Länge und 0,2 m Durchmesser, pH- und Redoxverhalten eines Lysimeters in der Umwelt sehr gut beschrieben werden konnte, sollte weiter verfolgt werden. Im Rahmen der Immobilisierungsexperimente würden solche relativ kleinen Säulen eine sinnvolle Lösung für Reihenexperimente darstellen. FuE-Bedarf existiert in diesem Punkt.

Die Analyse von organischen Inhaltsstoffen von MVA-Schlacken wurde, mit Ausnahme von PCDD und PCDF, selten durchgeführt. Die Elution wurde praktisch nicht untersucht. Hier existiert FuE-Bedarf.

7.5 Immobilisierung von Schadstoffen in MVA-Schlacken

Zur Immobilisierung von Schadstoffen werden heute zwei verschiedene Gruppen von Maßnahmen getroffen. Die erste Gruppe besteht aus Maßnahmen in der MVA. Dazu gehört die optimierte Führung des Brennguts im Brennraum (Verweilzeit, Temperatur usw.) mit dem Ziel, auch die Mobilität und das Vorhandensein toxischer Stoffe zu reduzieren. Zu dieser Gruppe von Maßnahmen gehören die integrierte bzw. nachgeschaltete Chloridwäsche und die aus bautechnischen Gründen durchgeführte Lagerung, die ebenfalls eine Verringerung der Eluierbarkeit mit sich bringt. Diese Verfahren werden heute in modernen MVA-Anlagen bzw. Schlackenaufbereitungsbetrieben weitgehend angewandt und sind Stand der Technik.

Die zweite Gruppe von Immobilisierungstechniken besteht aus der Zumischung organischer und anorganischer Stoffe zur MVA-Schlacke. Mindestens ein Dutzend Industrieverfahren werden heute angeboten und praktisch angewandt. Die erhaltenen Produkte haben sowohl bautechnisch als auch auf dem Gebiet der Eluierbarkeit von Schadstoffen vorzügliche Eigenschaften.

Aber: MVA-Schlacken konkurrieren mit natürlichen Baustoffen nicht, weil sie billiger sind. 20 DM/t sind nicht zu unterbieten. Sie werden als sekundäre Baustoffe eingesetzt, weil die Deponiekosten mit 60 DM/t wesentlich höher sind als die Kosten, die bei der Umwandlung von Rohschlacke in Sekundärbaustoffe entstehen. Eine Weiterbehandlung mit Zusatzstoffen erhöht in jedem Fall diese Kosten und ist damit nicht wünschenswert.

Für die Langzeitimmobilisierung von Schadstoffen wie Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{++} (und evtl. Na^+ , K^+ und Mg^{++}), für Schwermetalle und für organische Schadstoffe ist nach wie vor ein einfacher, kostengünstiger Prozeß, der in die MVA-Technik integriert werden kann, notwendig. Auf diesem Gebiet und zum Verständnis des Langzeitverhaltens der Schadstoffe in den MVA-Schlacken sind FuE-Arbeiten notwendig.

7.6 Anlagen im Technikumsmaßstab für die geplanten FuE-Arbeiten

Um Experimente, wie oben beschrieben, durchzuführen, sind Lysimeter mit ca. $4 \times 4 \text{ m}^2$ Fläche und einer variablen Füllhöhe bis zu 5 m, evtl. bis 10 m, sinnvoll (siehe auch Kapitel 3.5). Damit kann sichergestellt werden, daß sich anoxische/aerobe Verhältnisse einstellen, die der Umweltrealität entsprechen. Eine Zahl von 10 bis 12 Lysimetern dieser Art dürfte für die ersten 2 Jahre als angemessen angesehen werden. Der Boden wird mit wasserableitendem Kies bedeckt, und eine Probenahme für das Sickerwasser ist zu installieren. Der Betrieb muß unter normalen Umweltbedingungen und unter Schutzgas mit künstlicher Beregnung möglich sein.

Ein ursprünglich vorgesehener Lärmschutzwall, der nennenswerte Anteile von MVA-Schlacke enthält, muß unterhalb eine Ton- und Drainageschicht haben, und er muß auch oberhalb mit einer Ton- und einer Drainageschicht und Muttererde abgedeckt sein. Eine solche Bauweise würde die oben beschriebenen Untersuchungen unmöglich machen. Auch wenn man die obere Abdeckung wegläßt, stellt die Struktur

eines Lärmschutzwalls mit ihrer komplizierten Energie- und Sickerwasserbilanz eine unnötige Erschwerung der Untersuchungen dar. In jedem Fall wären wissenschaftliche Arbeiten der beteiligten Forschungsgruppen auf den oben vorgeschlagenen Lysimetersystemen durchführbar und die Interpretation der erhaltenen Ergebnisse wesentlich einfacher als auf einem Lärmschutzwall. Vom Bau eines Lärmschutzwalls sollte daher zugunsten einer Lysimeteranlage Abstand genommen werden.

Die oben beschriebenen Lysimeterexperimente sollen begleitet werden von Säulenexperimenten mit Säulen, die 1 bis 1,5 m hoch sind und 0,3 m Durchmesser haben. Die Ergebnisse für alle Eigenschaften und Inhaltsstoffe der gesammelten Sickerwässer sollen verglichen werden. Die Säulenexperimente müssen unter normalen Raumbedingungen und unter Schutzgas ausführbar sein.

8. Literatur

- [1] P. Scheiner
Rettet uns vor der Müllawine, ca & i Scheiner gmbh, D-7912 Weißendorn,
Mai 1987
- [2] Umwelt, 1992
- [3] N. Kurth
Erfahrungen beim Einsatz von Müllverbrennungsschlacke und Recyclings-
produkten im kommunalen Straßen- und Wegebau
Straße und Autobahn, 36, Nr. 4, 1985, S. 154-158
- [4] A.-S. Jandel
Bauschutt wiederaufbereiten - eine Bilanz
Umwelt Bd. 24, Nr. 3, 1994, S. 90-92
- [5] Verfasser unbekannt
Recycling - Baustoffe
Rohstoff-Rundschau Nr. 2, 1988, S. 29 - 32
- [6] B. Johnke
Schlackenverwertung und -entsorgung unter Beachtung der Vorgaben ge-
setzlicher und technischer Regelungen
Müll und Abfall, 1994, Beiheft 31, S. 200-206
- [7] K. Mesters
Abschätzung der Mobilisierbarkeit von leichtlöslichen Salzen aus Müllver-
brennungsschlacke am Beispiel eines Lärmschutzwalles
Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-
Universität Bochum, Nr. 5, Bochum, 1993
- [8] D. O. Reimann
Mengen, Beschaffenheit und Verwertungsmöglichkeiten von MV-Schlacken -
Gesamtübersicht
Müll und Abfall, Beiheft 31, 1994, S. 30-37
- [9] J. Berning
Neue Gedanken zu Deponierung
Wasser und Boden, 41, Nr. 3, 1989, S. 130-132
- [10] K. Krass, K. Rehbein, H. Blanke
Verwendung von industriellen Nebenprodukten und Recyclingbaustoffen im
kommunalen Straßenbau - Ergebnisse einer Umfrage
Straße und Autobahn, 38, Nr. 9, 1987, S. 326-330
- [11] J. Schneider, G. Pfrang-Stotz, H. Kössel
Charakterisierung von MV-Schlacken
Müll und Abfall, Beiheft 31, 1994, S. 38-43
- [12] K. Mesters
Untersuchungen über erforderliche Schutzmaßnahmen bei der Verwendung
von MV-Asche als Dammbaustoff
Abfallwirtschaftsjournal, 6, Nr. 1/2, 1994, S. 49-56
- [13] K. Krass, M. Radenberger
Verwertungsraten von industriellen Nebenprodukten und Recycling-
Baustoffen
Müll und Abfall, Beiheft 31, 1994, S. 11-15

- [14] W. Knobloch
Verwertung von Müllverbrennungsschlacke aus kommunaler Sicht
Städtetag 42, Nr. 1, 1989, S. 66-70
- [15] W. Schoppmeier
Aufbereitung fester Rückstände (Rohschlacke) aus der Hausmüllverbrennung
- Ein Bericht aus der Praxis
Abfallwirtschaftsjournal 4, Nr. 5, 1992, S. 416-424
- [16] L. Paoletti et al.
Caratterizzazione chemico-fisica e mineralogica delle scorie prodotte da impianti di combustione
ISTISAN 92/38, Istituto Superiore di Sanita, Roma, Italia, 88 S.
- [17] P. Kjeldsen, T. H. Christensen, O. Hjelmar
Selection of Parameters for Groundwater Quality Monitoring at Waste Incinerator Residue Disposal Sites
Environmental Technology Letters, Vol. 5, 1984, pp. 333-344
- [18] J. Hartlén, T. Lundgren
Utilisation of incineration bottom ash - legal, environmental and engineering aspects
„Waste material in construction“, Elsevier Science Publisher: Amsterdam, 1991, S. 207-214
- [19] International Ash Working Group
An International Perspective on Characterisation and Management of Residues from Municipal Solid Waste Incineration, Netherlands Energy Research Foundation, Petten, Netherlands, 1995
- [20] C. Hendriks, E. de Jong
Alternative Straßenbaustoffe in den Niederlanden
„Recycling in der Bauwirtschaft“, Verlag für Energie und Umwelttechnik, Berlin, 1987, S. 341-354
- [21] Verfasser unbekannt
Müllaufkommen weltweit
Umwelt, Bd. 24, Nr. 3, 1994, S. 73
- [22] H. Schröder
Die Entsorgung von Rückständen aus der thermischen Müllverwertung
In: Müllverbrennung 1988, Kap. V 19, VGB Kraftwerkstechnikverlag, Essen, 1988, S. 1-12
- [23] A. Toussaint
Verwertung von Verbrennungsrückständen aus MVA im Straßen- und Wegebau
VGB Kraftwerkstechnik 62, Heft 4, April 1982, S. 303-308
- [24] H. Pietrzeniuk
Stand der Verwertung der Rückstände aus MVA
In: Thermische Verfahren der Abfallwirtschaft. Energiegewinnung und Umweltverträglichkeit Statusbericht 1985, VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.), VDI: Düsseldorf 1985, S. 153-173

- [25] M. Schmidt, P. Vogel
The use of industrial by-products with hydraulic binders: refuse incineration ashes as an example
In: Waste materials in construction, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Elsevier Science Publisher: Amsterdam 1991, S. 177-186
- [26] M.M.Th. Eymael, W. de Wijs, D. Mahadew
The Use of MSWI Bottom Ash in Asphalt Concrete
Environmental Aspects of Construction with Waste Materials, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot and Th.G. Aalbers (Editors), Elsevier Science B.V., Amsterdam, 1994, S. 851-862
- [27] D.L. Gress, X. Zhang, S. Tarr, I. Pazierna und T.T. Eighmy
Municipal solid waste combustion ash as an aggregate substitute in asphaltic concrete
In: Waste materials in construction, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Elsevier Science Publisher: Amsterdam 1991, S. 161-178
- [28] J. Giglberger
Behandlungen von Rückständen aus der Müllverbrennung
VGB Kraftwerkstechnik 62, Heft 9, September 82, S. 786-788
- [29] J. Hild
Erfahrungen beim Einsatz von Müllverbrennungs-Asche im Tief- und Straßenbau mit unterirdischen Versorgungsleitungen
Müll und Abfall, Beiheft 31, 1994, S. 173-179
- [30] M.M.C. Alkemade, M.M.T. Eymael, E. Mulder, W. de Wijs
How to prevent expansion of MSWI bottom ash in road construction
In: Environmental aspects of construction with waste materials, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Bd./2, Elsevier Science: Amsterdam 1994, S. 863-876
- [31] K. Bosse (Berichterstatte)
- Verwertung von Schlacken aus der Müllverbrennung im Straßenbau,
Müll und Abfall, 2/81, S. 48-52, Seminar vom 2.-3.10.1980 in Berlin
- [32] W. Leuchs
Reststoff und seine Verwertung als Baumaterial
In: Jahresbericht '91: Landesamt für Wasser und Abfall NRW, Düsseldorf 1992, S. 7-17
- [33] J. Hachen
Verwertung von festen Verbrennungsrückständen aus Kraftwerken und Abfallverbrennungsanlagen
In: LWA-Materialien, Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Bd. 4, Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen: Düsseldorf 1987, S. 219-247
- [34] C.A. Johnson
Das Langzeitverhalten von Müllschlacke im Hinblick auf die Mobilität von Schwermetallen und Salzen
Müll und Abfall, Beiheft 31, 1994, S. 92-95

- [35] W. Schoppenheimer
Gezielte Aufbereitung fester Verbrennungsrückstände aus der Sicht eines privaten, überregionalen Schlackeaufbereiters und -verwerter
Müll und Abfall, Beiheft 31, 1994, S. 117-123
- [36] G. Kluge, H. Saalfeld und W. Dannecker
Untersuchung des Langzeitverhaltens von Müllverbrennungsschlacken beim Einsatz im Straßenbau
Asphalt Labor, Postfach 12 42, 23807 Wahlstedt (1980)
- [37] J. Vehlow
Bewertung des Umweltverhaltens von Reststoffen der Müllverbrennung
KfK-Nachrichten, Jahrgang 25, 4/93, S. 173- 181
- [38] S. Haep, Th. Leclair, K.G. Schmidt
MVA-Filteraschen einschmelzen und verwerten
Umwelt Bd. 24, Nr. 9, 1994, S. 442-444
- [39] J.G. Cabrera und G.R. Wolley
Fly ash utilisation in civil engineering
In: Environmental aspects of construction with waste materials, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Bd./2, Elsevier Science: Amsterdam 1994, S. 345-357
- [40] J.A.M. Mank, J. Brulot, W.H.J. van der Laak
Incineration slag in road constructions
In: Waste materials in construction, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Elsevier Science Publisher: Amsterdam 1991, S. 187-196
- [41] Y. Zimmels, G. Shelef, A. Boas
Application of fly ash and other waste material for the construction of an off shore island opposite the coast of Tel-Aviv
In: Environmental aspects of construction with waste materials
J.J.J.M: Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Bd./2, Elsevier Science: Amsterdam 1994, S. 329-344
- [42] K. Fichtel, W. Beck, J. Giglberger
Auslaugverhalten von Rückständen aus Abfallverbrennungsanlagen
Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Heft 55, R. Oldenburg Verlag, München, 1982, 51 Seiten
- [43] A. Reuter, U. Schirmer
Versuche zur Deponie von Filterstäuben aus der Müllverbrennung
VGB Kraftwerkstechnik 68, Heft 5, Mai 1988
- [44] E. Haas
Feldversuch zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von Müllverbrennungsschlacken
Baustoff-Recycling und Deponietechnik 6, 1990, Nr. 4, S. 15-18
- [45] U. Lahl und R. Struth
Verwertung von Müllverbrennungsschlacken aus der Sicht des Grundwasserschutzes.
Vom Wasser 80, 1993, S. 341-355

- [46] O. Hjelmar
 Characterization of lechate from landfilled MSWI ash
 Proc. - International conference on municipal waste combustion
 G. Theodore (Hrsg.), Bd. 1, Supply Serv. Canada: Ottawa 1989, S. 3/B1-3/B19
- [47] H.P. Lühr
 Anforderungen an Kraftwerksnebenprodukte bei der Verwendung im Bauwesen
 VGB Kraftwerkstechnik 58, Heft 5, Mai 1978
- [48] D. Holl
 Versuchsobjekt Lärmschutzwahl aus Müllschlacke
 In: Forschungsbericht Az. 3A/2-4257-3, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz München (Hrsg.), 1987
- [49] N. Gähl, G. Herz, A. Reuter, A. Toussaint
 Erfahrungen mit der Verwendung von Müllverbrennungsgaschen als Damm-schüttmaterial
 Straße und Autobahn, Heft 5, 1987
- [50] E.F.M. Nieuwenhuis, L. de Quelerij, J.K. Vrijling, G.J.H. Verger
 Potential reuse of waste materials in hydraulic engineering in the netherland
 In: Waste materials in construction, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Elsevier Science Publisher: Amsterdam 1991, S. 579-586
- [51] K.H. Thoemen
 Entsorgung der Reststoffe. Zum Beispiel MVA Düsseldorf.
 Entsorgungspraxis-Spezial, Nr. 4, 1988, S. 180-183
- [52] T.T. Eighmy, D. Domingo, D. Stämpfli, J.R. Krzanowski und D. Eudsen
 The nature of elements in incineration residues and other stabilized products
 International Incineration Conference: Thermal Treatment of Radioactive, Hazardous chemical Mixed and Medical Wastes, Proceedings, 1992, S. 495-499
- [53] P. Schoener
 Models for recycling of slags from waste incineration
 Stuttg. Ber. Abfallwirtsch. 55, Möglichkeiten der thermischen Abfallbehandlung und -verwertung, 1993, S. 25-37
- [54] V. Albino, R. Cioffi, L. Santoro, G.L. Valenti
 Disposal of solid wastes generated in **combustion*** and incineration processes
 Riv. Combust. 47, Nr. 5, 1993, S. 221-226
- [55] A.-M. Fällman, J. Hartlén
 Leaching of slags and ashes - controlling factors in field experiments versus in laboratory tests
 In: Environmental aspects of construction with waste materials, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Kap. 2, Elsevier Science: Amsterdam 1994, S. 39-54
- [56] R.N.J. Comans, J.A. Meima
 Modelling Ca-solubility in MSWI bottom ashes leachates
 In: Environmental aspects of construction with waste materials, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Bd./2, Elsevier Science: Amsterdam 1994, S. 103-110

- [57] P. Koch, J. Grote
Gezielte Schlackewäsche nach dem NOELL-Schlackeaufbereitungsverfahren
Müll und Abfall, Beiheft 31, 1994, S. 102-105
- [58] T.T. Eighmy et al.
Comprehensive Approach toward Understanding Element Speciation and Leaching Behavior in Municipal Solid Waste Incinerator Electrostatic Precipitation Ash
Environ. Sci. Technol., 1995, 29, S. 629-646
- [59] W. Baum, W.F. Sutton und T.E. Weyand
An optimized disposal and reuse characterization for thermal waste treatment residues
International Incineration Conference: Thermal Treatment of Radioactive, Hazardous chemical Mixed and Medical Wastes, Proceedings, 1992, S. 513-517
- [60] T.T. Eighmy et al.
Partiell Petrogenesis and Speciation of Elements in MSW Incineration Bottom Ashes
Environmental Aspects of Construction with Waste Materials, Elsevier Science B.V., 1994, Amsterdam, p. 111-136
- [61] G. Kluge
Feststellung von Kennwerten an Müllverbrennungsschlacken
Asphalt Labor, Postfach 12 42, 23807 Wahlstedt
- [62] W. Gerwinski et al.
Multielement-Analyse von Müllverbrennungs-Schlacke mit der Totalreflektions-Röntgenfluoreszenz (TRFA)
Fresenius Z., Anal. Chem., 327, 1987, S. 293-296
- [63] H.A. van der Sloot, D.S. Kosson, T.T. Eighmy, R.N. Comans und O. Hjelm
Approach towards international standardization: A concise scheme for testing of granular waste leachability
J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Kap. 2, Elsevier Science: Amsterdam 1994, S. 453-466
- [64] D.O. Reimann
Die Bamberger Schlackewäsche als langjährig bewährtes Verfahren zur Chloridreduzierung
Müll und Abfall, Beiheft 31, 1994, S. 96-101
- [65] K. Krass und K. Mesters
Wasserwirtschaftliche Gesichtspunkte bei der Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßen- und Erdbau
Müll und Abfall, Beiheft 31, 1994, S. 179-183
- [66] M. Janssen-Jurkovicova, G.G. Hollman, M.M. Nass, R.D. Schuiling
Quality assessment of granular combustion residues by a standard column test: prediction versus reality
In: Environmental aspects of construction with waste materials, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Bd./2; Elsevier Science: Amsterdam 1994, S. 161-178
- [67] M. Wahlström et al.
Leaching of organic contaminants from contaminated soil and waste materials
Environmental Aspects of Construction with Waste Materials, Elsevier Science B.B., Amsterdam, 1994, S. 257-270

- [68] T.T. Eighmy, A.A. van der Sloot
A Unified Approach to Leaching Behaviour of Waste Materials
Environmental Aspects of Construction with Waste Materials, Elsevier
Science B.B., Amsterdam, 1994, S. 979-988
- [69] H.A. van der Sloot, D. Holde, R.N.J. Comans
The Influence of Reducing Properties on Leaching of Elements from Waste
Materials and Construction Materials
Environmental Aspects of Construction with Waste Materials, Elsevier
Science B.B., Amsterdam, 1994, S. 483-490
- [70] H.A. van der Sloot, et al.
Intercomparison of Leaching Tests for Stabilized Waste
Environmental Aspects of Construction with Waste Materials, 1994, Elsevier
Science B.V., Amsterdam, S. 63-76
- [71] DIN 38414, Teil 4, Schlamm und Sedimente (Gruppe S)
Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4), Oktober 1984
- [72] J.A. Stegmann und J. Schneider
Leaching potential of municipal waste incineration bottom ash as a function of
particle size distribution
In: Waste materials in construction, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot
und T.G. Aalbers (Hrsg.), Elsevier Science Publisher: Amsterdam 1991, S.
135-144
- [73] E. Mulder
The leaching behavior of some primary and secondary raw materials used in
pilot-scale road bases
In: Waste materials in construction, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot
und T.G. Aalbers (Hrsg.), Elsevier Science Publisher: Amsterdam 1991, S.
255-264
- [74] A. Esser und H.-J. Schwefer
Untersuchung von Schlacke aus Kraftwerken und Abfallbehandlungsanlagen
auf ihre Umweltverträglichkeit
Müll und Abfall, Beiheft 31, 1994, S. 215-219
- [75] F. Nüßlein, P. Wunsch, F. Rampp, A. Kettrup
Influence of combustion bed temperature on concentration and leachability of
metals in slags from an incinerating plant
Chemosphere 28, Nr. 2, 1994, S. 349-356
- [76] H.S. Buijtenhek, J.J. Steketee, J.H. de Zeeuw, Al Deventer
Praxisbezogene Entwicklungen und Techniken zur gezielten Schlackewäsche
Müll und Abfall, Beiheft 31, 1994, S. 82-85
- [77] J.J. Steketee und L.G.C.M. Urlings
Enhanced natural stabilization of MSWI-bottom ash: a method for minimizati-
on of leaching
In: Environmental aspects of construction with waste materials, J.J.J.M. Gou-
mans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Bd./2; Elsevier Science:
Amsterdam 1994, S. 233-238

- [78] D.S. Kosson, H. A. van der Sloot, T. Holmes, C. Wiles
Leaching properties of untreated and treated residues tested in the USEPA program for evaluation of treatment and utilization technologies for municipal waste combustion residues
In: Waste materials in construction, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Elsevier Science Publisher: Amsterdam 1991, S. 119-134
- [79] P.J. Pichat
Chemical Stabilization of ashes from high temperature incineration facilities in Europe
International Incineration Conference: Thermal Treatment of Radioactive, Hazardous chemical Mixed and Medical Wastes, Proceedings, 1994, S. 639-642
- [80] V. Albino et al.
Release of heavy metals from a municipal solid waste incineration residue stabilized in non-traditional matrices
In: Environmental aspects of construction with waste materials, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Bd./2, Elsevier Science: Amsterdam 1994, S. 789-801
- [81] H.T.M. van der Laar, J. Slageter, R.F. Duzijn, H.J. de Zeeuw
Quality improvement of MSW-fly ash and APC-residue from MSW-incinerator Amsterdam-West using different immobilisation processes
In: Environmental aspects of construction with waste materials, J.J.J.M. Goumans, H.A. van der Sloot und T.G. Aalbers (Hrsg.), Bd./2, Elsevier Science: Amsterdam 1994, S. 811-821
- [82] F. Howanietz und F. Stoeckel
Manufacture of pore-free, closed-surface aggregates from inorganic waste materials and organic binders
Austrian, 6 pp. AT 387566 B 890210
- [83] E. Hansen und O. Hjelmars
Leaching properties of substances from marine-deposit combustion waste
Report: NEI-DK-1010; Order No. DE 93752803, 161 pp. Avail.: NTIS From: Energy Res. Abstr. 1993, 18(3), Abstr. 6583, 1993
- [84] H. Kobayashi
Fusion of incinerator ashes and sewer sludges
Jpn. Kokai Tokyo Koho, 5 pp. JP 55067396 800521 Showa
- [85] G.A. Habel
Verfahren zur Herstellung eines Zuschlagstoffes für Baumaterialien aus Abfallschlacke und Filterasche aus MVA
In: Recycling Berlin '79, K.J. Thome-Kozmiensky (Hrsg.), Bd. 1, Verlag für Umwelttechnik: Berlin 1979, S. 596-698
- [86] W. Ripenhoff
Anlage einer Versuchsstrecke unter Mitverwendung von Müllverbrennungsschlacke als Unterbau für den Straßenbau
Gemeinde Hagen am Teuteburger Wald
Gemeindeverwaltung, Schulstr. 7, 49170 Hagen
- [87] R. Gutmann, H. Vonmont
Ektrofilterasche aus Müllverbrennungsanlagen
UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox. 6 (5), 1994, S. 257-263

- [88] H. Braun
Forschung und Entwicklung im KfK zur Hausmüllverbrennung
KfK-Nachrichten, Jahrg. 24, 4/92, S. 234-244
- [89] H. Steffen
Anforderungen an Planung, Bau und Betrieb von
Inertstoff-/Schlackedeponien
Müll und Abfall, Beiheft 31, 1994, S. 188-195
- [90] LAGA-Merkblatt 1994
Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle
Verabschiedet am 1./2. März 1994
- [91] TA-Siedlungsabfall
Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz
Bundesanzeiger, Jahrgang 45, Nr. 99 a, 14.5.1992
- [92] Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz-
AbfG)
BGBl. I S. 1410, 1501 vom 27.8.1986
- [93] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunrei-
nigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-
Immissionsschutzgesetz)
BGBl. I S. 880 vom 14.5.1990
- [94] C.A. Johnson
Neutralizing Capacity of Municipal Waste Incinerator Bottom Ash
Environ. Sci. Technol., 29, 1995, p. 142-147
- [95] J. Schneider, J. Vehlow, H. Vogg
Improving the MSWI Bottom ash Quality by Simple In-Plant Measures
WASCON '94, June 1-3, 1994, Maastricht, The Netherlands
- [96] H. Vogg
Von der Schadstoffquelle zur Schadstoffsenke - neue Konzepte der Müllver-
brennung
Chem.-Ing.-Tech. 60, 1988, S. 247
- [97] G. Hirschmann, U. Förstner
Untersuchungen zum Deponieverhalten von Schlacken aus Abfallverbren-
nungsanlagen für Hausmüll
BMBF-Statusseminar Deponiekörper, 25. und 26. April 1995, Wuppertal, S.
77-104

Anhang: Definition wichtiger Begriffe

Abfall

Abfälle sind Materialien, derer sich der Besitzer entledigen will oder deren geordnete Entsorgung zur Wahrung des Wohls der Allgemeinheit, insbesondere des Schutzes der Umwelt, geboten ist. Als Abfälle werden Reststoffe bezeichnet, die nicht weiter nutzbar sind und deren Entstehung nicht vermeidbar ist (Vermeidungs- und Verwertungsgebot der TA-Siedlungsabfall).

Anorganische Reststoffe

Anorganische Stoffmenge, die nach der primären Nutzung, in der Produktion oder bei der Abfallbehandlung anfällt und dessen weitere Verwendung bzw. Entsorgung zunächst nicht bekannt ist.

Deponie

Abfallentsorgungsanlage, in der Abfälle auf Dauer abgelagert werden.

Langzeitsichere Entsorgung

Entsorgungsmethode, die über einen Zeitraum von > 1000 Jahren eine Erhöhung der bereits vorhandenen Schadstoffgehalte in der Umgebung der Entsorgungseinrichtung verhindert.

Mineralische Reststoffe

Reststoffe, die aus Mineralen (kristallinen Phasen) aufgebaut sind.

Mineralisierte Reststoffe

In der Entsorgungswirtschaft verwendeter Begriff für anorganische Reststoffe. Hier meist für teilverglaste Produkte gebraucht.

Mobilisierung/Mobilität

Mobilität ist die Geschwindigkeit der Verteilung eines Stoffes in der Umwelt und wird durch den Übergang des Stoffes von einem Umweltmedium ins andere (beispielsweise durch Abregnen aus der Luft ins Wasser) bzw. durch die Verteilung in den einzelnen Umweltmedien bestimmt. Die Mobilität eines Schadstoffes kann eingeschränkt werden (Immobilisierung), indem dieser durch chemische oder physikalisch-chemische Vorgänge an eine andere Verbindung mit höherer Stabilität umgewandelt wird.

Reststoffe

Summe der in einer Produktionsanlage anfallenden, nicht direkt nutzbaren Stoffe. Sie bestehen aus Wertstoffen und Abfällen

Rohschlacke

Als Rohschlacken einer Hausmüllverbrennungsanlage werden die aus Rostabwurf und Rostdurchfall bestehenden Gemenge aus gesinterten Verbrennungsprodukten, Eisenschrott und anderen Metallen, Glas und Keramik, anderen mineralischen Bestandteilen sowie unverbrannten Resten definiert. Der Rostabwurf ist definiert als fester Verbrennungsabfall, der am Ende des Verbrennungsrostes in den Naßentschlacker oder ein anderes Austragssystem abgeworfen wird. Unter dem Rost-

durchfall werden feste Verbrennungsabfälle verstanden, die durch Spalten des Verbrennungsrostes in den darunter liegenden Luftkasten fallen.

Schadstoffe und Schadelemente

Stoffe (Elemente), die in besonderem Maß gesundheits-, luft-, wasser- oder bodengefährdend sind.

Schlacke

Aufbereitete und gealterte Rohschlacken werden als Schlacke bezeichnet. Kesselstäube, Filterstäube und Reaktionsprodukte aus der Abgasreinigung fallen nicht unter den Begriff der Müllverbrennungsschlacken.

Sekundärrohstoff

Aus einer Gesamtabfallmenge durch einen Recyclingprozeß, z. B. Trenn- oder Sortierverfahren, gewonnener, wiederverwendbarer Stoff.

Wertstoffe

Abfallbestandteile oder Abfallfraktionen, die für die Herstellung verwertbarer Zwischen- und Endprodukte geeignet sind.